doi: 10.33266/2070-1004-2026-3-37-49
УДК 623.454.86:504.064 (574)

Обзорная статья
© ФМБЦ им.А.И.Бурназяна

ОБЪЕКТ ЯДЕРНОГО НАСЛЕДИЯ. СЕМИПАЛАТИНСКИЙ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ПОЛИГОН: ПРОШЛОЕ И НАСТОЯЩЕЕ

С.М.Киселев[1], Ю.Н.Зозуль[1], С.М.Шинкарёв[1]

[1] ФГБУ «ГНЦ – Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И.Бурназяна» ФМБА России, Москва, Россия

Резюме. *Цель исследования* – представить обзор научных исследований в области радиационной защиты, радиоэкологии и радиобиологии, проведенных на уникальной исследовательской площадке Семипалатинского испытательного полигона (СИП).
Материалы и методы исследования. Материалы исследования – материалы XI Международной конференции «Семипалатинский испытательный полигон: наследие и перспективы развития научно-технического потенциала» (г. Курчатов, Республика Казахстан, 4–11 октября 2025 г.) и научные публикации, касающиеся радиоэкологических и радиобиологических исследований на территории полигона.
Методы исследования – методы анализа и прогнозирования.
Результаты исследования и их анализ. Рассмотрено историческое наследие Семипалатинского испытательного полигона. Приведены результаты современных исследований специалистов Института радиационной безопасности и экологии (ИРБЭ) Национального ядерного центра Республики Казахстан, посвящённых радиобиологическим и радиоэкологическим последствиям ядерных испытаний. Проанализированы дозы облучения населения, проживавшего как на территории полигона, так и в прилегающих населённых пунктах. Представлены прогнозные расчёты дозовых нагрузок для случаев возможного проживания и хозяйственной деятельности на данной территории.
Сделаны выводы, что накопленные экспериментальные данные и апробированные радиоэкологические подходы, применяемые при проведении исследований на территории Семипалатинского испытательного полигона, позволяют осуществить переход от описательного анализа к системному оцениванию рисков и построению прогнозных моделей радиационно-экологической безопасности для территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате ядерных испытаний.

Ключевые слова: *биота, дозы облучения, мониторинг, население, объект ядерного наследия, окружающая среда, Республика Казахстан, Семипалатинский испытательный полигон, ядерные испытания*

Конфликт интересов. Авторы статьи подтверждают отсутствие конфликта интересов

Для цитирования: *Киселев С.М., Зозуль Ю.Н., Шинкарёв С.М.* Объект ядерного наследия. Семипалатинский испытательный полигон: прошлое и настоящее // Медицина катастроф. 2026. №3. С. 37-49. doi: 10.33266/2070-1004-2026-3-37-49

doi: 10.33266/2070-1004-2026-3-37-49
UDC 623.454.86:504.064 (574)

Review article
© Burnasyan FMBC FMBA

NUCLEAR LEGACY. SEMIPALATINSK TEST SITE: PAST AND PRESENT

S.M.Kiselev[1], Yu.Zozul[1], S.M.Shinkarev[1]

[1] State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Moscow, Russian Federation

Summary. *Purpose of the study* – to review of scientific research in the field of radiation protection, radioecology, and radiobiology at the unique research site of the Semipalatinsk Nuclear Test Site.
Materials and methods of the study. The review was based on the materials of the XI International Conference 'Semipalatinsk Test Site: Heritage and Prospects for the Development of Scientific and Technical Potential' (Kurchatov, Kazakhstan, October 4-11, 2025) and scientific publications related to radioecological and radiobiological studies conducted at the test site.
Results of the study. The paper examines the historical heritage of the Semipalatinsk Nuclear Test Site. It presents the results of modern studies by specialists from the IRSE (Institute of Radiation Safety and Ecology) of the National Nuclear Center Republic of Kazakhstan, dedicated to the radiobiological and radioecological consequences of nuclear tests. The radiation exposure doses of the population living both on the territory of the test site and in adjacent settlements are analyzed. Predictive calculations of radiation exposure are presented for cases of potential residence and economic activity in this territory.
Conclusions. The accumulated experimental data and radioecological approaches at the territory of the Semipalatinsk Nuclear Test Site make it possible to move from descriptive analysis to the risk assessment and the development of predictive models of radiation safety for areas affected by radioactive contamination of nuclear test sites.

Key words: *biota, environment, exposure doses, monitoring, nuclear legacy, population, Republic of Kazakhstan, Semipalatinsk nuclear test site*

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest

For citation: *Kiselev S.M., Zozul Yu., Shinkarev S.M.* Nuclear Legacy. Semipalatinsk Test Site: Past and Present. *Meditsina Katastrof* = Disaster Medicine. 2026;3:37-49 (In Russ.). doi: 10.33266/2070-1004-2026-3-37-49

Контактная информация:
Киселев Сергей Михайлович – зав. лабораторией ФГБУ «ГНЦ – Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И.Бурназяна» ФМБА России
Адрес: Россия, 123098, Москва, ул. Живописная, д. 46
Тел.: +7 (499) 190-93-35
E-mail: fmbc@fmbamail.ru

Contact information:
Sergey M. Kiselev – Head of the Laboratory of State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency
Address: 46, Zhivopisnaya str., Moscow, 123098, Russia
Phone: +7 (499) 190-93-35
E-mail: fmbc@fmbamail.ru

Введение

С 4 по 11 октября 2025 г. в г. Курчатов (Республика Казахстан) состоялась XI Международная конференция «Семипалатинский испытательный полигон: наследие и перспективы развития научно-технического потенциала». Уникальная площадка Семипалатинского испытательного полигона (СИП) объединила усилия многих ученых и специалистов из разных научных коллективов, исследования которых сформировали серьезный научный задел, существенно расширив теоретическую базу радиобиологии и радиационной медицины, сформировав информационное поле, необходимое для решения ключевых прикладных задач. Научная деятельность плеяды ученых Института биофизики Минздрава СССР неразрывно связана с исследованиями на полигоне. Результаты этих исследований внесли существенный вклад в понимание механизмов биологического действия ионизирующего излучения и патогенеза лучевой болезни. В настоящее время на СИП ученые и специалисты Национального ядерного центра Казахстана изучают радиобиологические и радиоэкологические механизмы последствий воздействия на окружающую среду и человека прошлой деятельности по ядерным испытаниям в военных и мирных целях. Основная цель настоящей статьи – представить обзор научных исследований в области радиационной защиты, радиоэкологии и радиобиологии на уникальной исследовательской площадке Семипалатинского испытательного полигона

Цель исследования – представить обзор научных исследований в области радиационной защиты, радиоэкологии и радиобиологии, проведенных на уникальной исследовательской площадке Семипалатинского испытательного полигона.

Материалы и методы исследования. Материалы исследования – материалы XI Международной конференции «Семипалатинский испытательный полигон: наследие и перспективы развития научно-технического потенциала» (г. Курчатов, Республика Казахстан, 4–11 октября 2025 г.) и научные публикации, касающиеся радиоэкологических и радиобиологических исследований на территории полигона.

Методы исследования – методы анализа и прогнозирования.

Результаты исследования и их анализ.

Исторический экскурс

Семипалатинский испытательный полигон, являвшийся крупнейшим испытательным полигоном Советского Союза, расположен в северно-восточной части Казахстана. Решение о сооружении специального полигона для испытаний ядерного оружия было принято на основании Постановления Совета Министров СССР от 14 ноября 1946 г. Всего в 1949–1989 гг. на полигоне было проведено 456 ядерных испытаний. Наибольшее количество испытаний пришлось на начало 60-х гг., когда осуществлялся переход от ядерных испытаний в атмосфере к подземным ядерным испытаниям. Официально объект был закрыт 29 августа 1991 г. [1].

Площадь бывшего СИП, на территории которого находится г. Курчатов, составляет 18 311,4 км^2 (рис. 1). В настоящее время территория полигона относится к землям запаса, находящимся в ведении исполнительных органов трех областей Республики Казахстан: Абайской, Павлодарской и Карагандинской. Значительная часть его территории пригодна для использования, однако простаивает ввиду отсутствия разделения на загрязненные и чистые территории.

В Абайской области испытания осуществляли на следующих площадках [2]:

- «Сары-Узень» (325 км^2), где с 1965 по 1980 гг. провели 24 подземных ядерных взрыва в вертикальных скважинах;
- «Актан-Берли» (34 км^2), где с 1958 по 1989 гг. проводили неядерные эксперименты различных типов в скважинах глубиной от 5 до 30 м. Точное количество проведенных испытаний – неизвестно;
- «Дегелен» (240 км^2), где в 1961–1989 гг. проведено 209 подземных ядерных взрывов в горизонтальных штольнях;
- «Телькем» (42 км^2), где в течение месяца в 1968 г. провели два подземных ядерных взрыва;
- «Балапан» (771,5 км^2), где с 1965 по 1989 год взорвали под землёй 105 ядерных зарядов.

В границах Павлодарской области в пределах СИП имелись две испытательные площадки [2]:

- «Опытное поле» (270 км^2), где с 1949 по 1962 гг. проведено 116 атмосферных ядерных испытаний (30 наземных и 86 воздушных взрывов), а также 45 неядерных взрывов;
- «4а» (40 км^2), где с 1953 по 1957 гг. провели неизвестное количество испытаний боевых радиоактивных веществ (БРВ). Источником радиоактивного загрязнения объектов окружающей среды считается распыление жидких или порошкообразных радиоактивных рецептур.

На территории Карагандинской области имелась всего одна площадка «4» (24 км^2), где проводили испытания БРВ с 1953 по 1957 гг. Точное их количество – неизвестно [2].

Площадки испытаний и прилегающие территории

Площадка «Опытное поле» была первой испытательной площадкой Семипалатинского полигона, которая предназначалась для проведения атмосферных (наземных и воздушных) ядерных испытаний в период с 1949 по 1962 гг. Площадка расположена на расстоянии около 50 км от г. Курчатов. Первое испытание ядерного устройства на «Опытном поле» было проведено 29 августа 1949 г. Здесь же 12 августа 1953 г. было испытано первое ядерное устройство с нейтронным усилением, а 22 ноября 1955 г. – водородная бомба. Всего на «Опытном поле» было проведено 116 ядерных

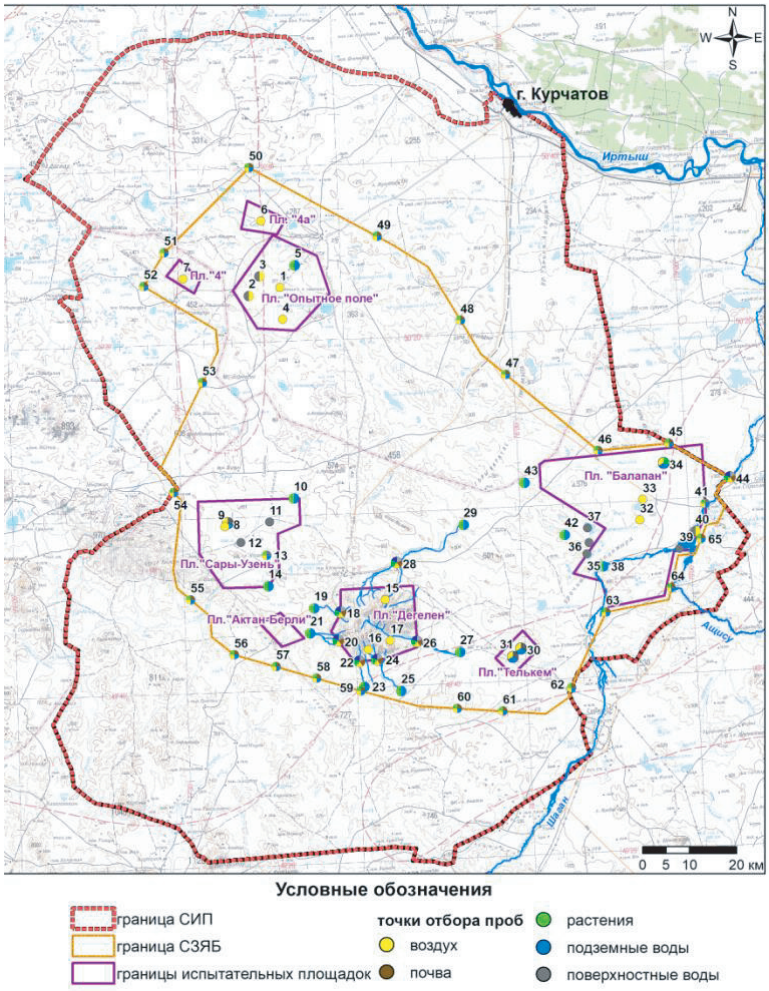

Рис. 1. Схема бывшего Семипалатинского испытательного полигона (СИП) с указанием планируемых границ и объектов Семипалатинской зоны ядерной безопасности – СЗЯБ [7]

Fig. 1. Diagram of the former Semipalatinsk Test Site (STS) showing the planned boundaries and facilities of the Semipalatinsk Nuclear Safety Zone [7]

испытаний, из них воздушных – 86, наземных – 30 [1]. Места проведения испытаний можно условно разделить на три группы: 1 – места проведения ядерных испытаний с большим энерговыделением, которые характеризуются наличием значительных количеств продуктов деления (^{137}Cs, ^{90}Sr) до n×10^5 Бк/кг ядерного взрыва; 2 – места ядерных экспериментов с малым или полным отсутствием ядерного энерговыделения, характеризующихся наличием высоких концентраций изотопов материала заряда ($^{239+240}$Pu, ^{241}Am) до n×10^6 Бк/кг; 3 – места проведения испытаний с высоким (интенсивным) нейтронным потоком, характеризующимся наличием, помимо продуктов деления и изотопов самого заряда, значительным количеством продуктов активации (^{60}Co, изотопы Eu, ^{3}H и др.) до n×10^4 Бк/кг [3].

Площадки «Сары-Узень» и «Балапан» использовались для проведения подземных ядерных взрывов в скважинах. На «Балапане» было произведено 105 боевых испытаний в 106 скважинах, на «Сары-Узене» – 24 испытания в 25 скважинах [1]. Проведение ядерных экспериментов на обеих площадках началось в 1965 г. и продолжалось вплоть до 80-х гг. Небольшим отличием площадок являлись глубина закладки боезаряда и его мощность. Например, средняя глубина закладки ядерного заряда на «Балапане» составляла 650 м, на «Сары-Узене» – около 250 м. Мощность взрывов также довольно сильно варьировала и достигала 150 кт [4]. Основная часть площадок, не попавшая под локальные радиоактивные выпадения, характеризуется следующими значениями средней концентрации техногенных радионуклидов (ТРН): ^{241}Am – n×10 Бк/кг; ^{137}Cs – n×10 Бк/кг; ^{90}Sr – n×10 Бк/кг и обусловлена глобальными выпадениями. Присутствие зон с повышенными значениями удельной активности ТРН вызвано двумя основными факторами: выпадением радиоизотопов из атмосферы вследствие взрывов на других площадках и выпадением радиоизотопов от проведения испытаний с радиоактивным выбросом на самих площадках.

Экскавационные взрывы. В период с 1965 по 1968 гг. было произведены 4 экспериментальных мирных ядерных взрыва с выбросом грунта для отработки способов создания искусственных водохранилищ. Первый и самый мощный экскавационный ядерный взрыв был произведен 15 января 1965 г. в месте слияния основных водных артерий Семипалатинского полигона – рек Шаган и Ащису [5]. В результате взрыва мощностью 140 кт образовалось два больших водоема: внутренний (воронка глубиной 100 м, диаметром 520 м и объемом 6 млн м^3) и внешний. Несколько воронок образовалось в результате нештатных ситуаций при проведении испытаний в скважинах №101 (пл. «Сары-Узень») и № 1204 (пл. «Балапан»). Основная часть радионуклидов, образовавшихся

во время взрывов, сосредоточена в зонах навала грунта, а сверхнормативное радиоактивное загрязнение прилегающей территории ограничено расстоянием от 200 м («Телькем-1, -2») до 10 км («Атомное» озеро). В настоящее время большая часть этих воронок заполнена водой или имеет сезонное наполнение [4].

Испытательная площадка «Дегелен» использовалась для проведения подземных ядерных испытаний средней и малой мощности. Площадка расположена в одноименном горном массиве, представляющем собой куполовидное поднятие с диаметром 17–18 км [1]. Общая площадь данной площадки составляет ~300 км^2. Подземные ядерные испытания проводились в штольнях. Всего в 1961–1989 гг. было проведено 209 ядерных испытаний в 181 штольне. С 1996 по 1998 гг. на площадке «Дегелен» были проведены работы по закрытию всех штолен с целью исключения возможности их повторного использования для ядерных испытаний. Эти работы выполнялись в рамках Соглашения между Министерством обороны США и Министерством энергетики и минеральных ресурсов Республики Казахстан, заключенного для ликвидации инфраструктуры испытаний ядерного оружия. Радиоэкологическое обследование площадки «Дегелен» показало, что большая часть её территории не имеет радиоактивного загрязнения, так как основная доля (более 90%) радиоактивности, наработанная в процессе ядерных испытаний, сосредоточена в полостях штолен. Однако существуют участки с повышенными концентрациями радионуклидов в объектах окружающей среды (почва, вода, растительность). Такие участки сформированы, в основном, в результате: нештатных ситуаций при проведении ядерных испытаний; вскрытия штолен после проведения испытаний; выноса радионуклидов из полостей штолен водным путем [5].

Испытания боевых радиоактивных веществ, площадки 4, 4а. В 1953–1957 гг. были реализованы программы по испытанию БРВ. Боевые радиоактивные вещества представляли собой жидкие или порошкообразные радиоактивные рецептуры, изготовленные либо из отходов радиохимического производства, либо путем облучения специально подобранных веществ нейтронами на атомном реакторе. Их удельная активность варьировала от десятых долей до нескольких единиц кюри на литр [6]. Испытания БРВ проводились на площадках «4» и «4а», расположенных западнее и севернее «Опытного поля». Рассеяние БРВ осуществлялось путем подрыва отдельных снарядов, бомбардировки участков минометными снарядами, сброса бомб с бомбардировщиков или распыления БРВ с самолетов. В результате проведенных исследований на территории площадок было обнаружено более 30 участков локального радиоактивного загрязнения. Основным загрязнителем является радионуклид ^{90}Sr, максимальная удельная активность которого в почвенном покрове достигает 5×10^8 Бк/кг, что соответствует среднеактивным радиоактивным отходам. При этом в почвенном покрове присутствуют радионуклиды $^{239+240}$Pu, ^{152}Eu, ^{154}Eu, ^{137}Cs, ^{241}Am, ^{60}Co, но в гораздо меньшем количестве – на уровне $n\times10^3 – n\times10^6$. Площадь участков радиоактивного загрязнения варьирует от сотен до сотен тысяч квадратных метров, а протяженность некоторых участков достигает километра [5].

Следы радиоактивных выпадений. Радиоактивное загрязнение за пределами территорий испытательных площадок сформировалось в результате выпадений продуктов ядерных взрывов из радиоактивных облаков, которые перемещались в различных направлениях от мест проведения испытаний [5]. Из всех наземных ядерных испытаний, проведенных на Семипалатинском полигоне, можно выделить не более десятка ядерных испытаний, которые, в основном, определили масштабы радиоактивного загрязнения окружающей среды на территории полигона и прилегающих к нему регионов. Исследования последнего десятилетия подтвердили наличие следов радиоактивных выпадений далеко за пределами испытательных площадок. Следы от наземных ядерных испытаний вытянуты от «Опытного поля» практически до границ полигона. При ширине следов до 15 км их длина составляет свыше 100 км. Лабораторные анализы отобранных проб почвы в пределах этих следов выявили наличие искусственных радионуклидов ^{137}Cs, ^{90}Sr, $^{239+240}$Pu, ^{241}Am, ^{60}Co и изотопов Eu. Максимальное содержание радионуклидов в почве на следах радиоактивных выпадений выявлено на расстоянии около 40 км от эпицентра испытаний на площадке П-1 в количестве до $n\times10^3$ Бк/кг [4].

Современный статус полигона

В Республике Казахстан 5 июля 2023 г. был принят закон №16-VIII ЗРК «О Семипалатинской зоне ядерной безопасности», которым предусматривается создание Семипалатинской зоны ядерной безопасности (СЗЯБ) со специальным правовым режимом на территориях, подвергшихся сверхнормативному радиоактивному загрязнению.

Уполномоченной организацией по управлению сверхнормативно загрязненными землями полигона назначена подведомственная организация Агентства по атомной энергии Республики Казахстан (РК) Национальный ядерный центр Республики Казахстан (НЯЦ РК) на базе комплекса бывшего СИП и соответствующих научных организаций и объектов.

Из состава земель запаса бывшего СИП в земли СЗЯБ планируется передать 8336,91 км^2, которые подверглись сверхнормативному радиоактивному загрязнению вследствие испытаний ядерного оружия. Остальные территории, не подвергавшиеся загрязнению вследствие проведенных испытаний и не представляющие радиационную опасность для населения, могут быть рекомендованы для выведения из категории земель запаса и переданы в хозяйственный оборот (~9974,49 км^2). После установления границы и площади земельных участков СЗЯБ территории СИП, не подвергавшиеся загрязнению вследствие проведенных испытаний, могут быть переданы в хозяйственный оборот исполнительными органами местной власти [1, 8].

Семипалатинской испытательный полигон – уникальная площадка для радиобиологических и радиоэкологических исследований

Для медико-биологического сопровождения ядерных испытаний на СИП была сформирована воинская часть №52605. Научно-исследовательские лаборатории были хорошо оснащены необходимым оборудованием, в двухэтажном виварии содержалось более 750 морских свинок, 400 кроликов, 500 белых мышей, 1500 белых крыс, 20 обезьян, вольеры были рассчитаны на 114 собак, из местных совхозов перед взрывами дополнительно брали коров, лошадей, овец [9]. В ходе проведения исследований уточнялись представления о действии поражающих факторов ядерного оружия на биообъекты. Были разработаны принципы организации и осуществления лечебных мероприятий на этапах медицинской эвакуации пораженных ударной волной и другими поражающими

факторами ядерного взрыва. Наряду со специалистами учреждений Минобороны СССР активное участие в указанной работе принимало руководство 3-го Главного управления при Минздраве СССР во главе с А.И.Бурназяном. Более 300 учёных разных лабораторий Института биофизики Минздрава СССР в полевых и лабораторных условиях проводили медико-биологические исследования на крупных и мелких лабораторных животных, изучали течение острой лучевой болезни (ОЛБ) при воздействии радиации в разных дозах и эффективность применяемых противолучевых средств. Именно в этот период были разработаны оригинальные противолучевые средства различного назначения: РС-10 и его аналог РС-11, продигиозан – средства раннего лечения и Б-190 – радиопротектор экстренного действия. Кроме того, был разработан метод детоксикации на основе гемосорбции, а также схема комплексной терапии и средства борьбы с ранними проявлениями первичной реакции на облучение. Одним из важных этапов исследований в те годы, наряду с доклиническим изучением, являлась оценка эффективности новых лекарственных средств в условиях, моделирующих лучевые поражения при ядерном взрыве [10].

Для исследования бывшего СИП и нормализации радиоэкологической обстановки на его территории и в прилегающих районах в 1993 г. был создан Институт радиационной безопасности и экологии (ИРБЭ) в г. Курчатове – филиал Национального ядерного центра Республики Казахстан на базе научно-исследовательских подразделений войсковой части №52605 и радиоэкологических подразделений НЯЦ РК. Основные направления исследований, проводящихся в ИРБЭ, включают комплексные исследования радиоэкологического состояния различных частей полигона. Институт разрабатывает и реализует мероприятия по рекультивации радиационно-загрязнённых территорий, включая дезактивацию помещений, оборудования и материалов.

Особенности радиоэкологического состояния загрязненных территорий

В 2008–2021 гг. было проведено комплексное радиоэкологическое обследование территории СИП в рамках государственной программы «Обеспечение безопасности бывшего Семипалатинского испытательного полигона». Важно отметить, что уже с момента закрытия полигона в 1991 г. начались исследования по оценке радиационного фона на испытательных площадках. Результаты этого масштабного обследования показали, что основная часть радиоактивно-загрязнённых земель расположена на восьми испытательных площадках полигона – таких, как: «Опытное поле», «Дегелен», «Балапан» и др. (см. рис. 1). Также было установлено, что значительное загрязнение распространилось на территории между этими площадками вследствие радиоактивных выпадений. Радиоактивные осадки распространились на десятки километров от эпицентров взрывов, что значительно увеличило площадь потенциально опасных земель. Главный итог экологического обследования заключался в том, что была определена территория площадью около 8400 км^2, которая представляла реальную радиационную опасность для населения и нуждалась в особом контроле и проведении реабилитационных мероприятиях. Установлены диапазоны значений удельной активности радионуклидов ^{137}Cs, ^{90}Sr, $^{239+240}$Pu и ^{241}Am в грунтах и рассчитаны значения поверхностной активности этих радионуклидов (табл. 1) – [11]. Результаты мониторинговых исследований послужили информационной основой для создания Семипалатинской зоны ядерной безопасности [7]. Для оценки масштабов исследований следует отметить, что территория СИП сопоставима по площади с территорией ряда европейских государств, например, Словении [3].

Распределение техногенных радионуклидов в компонентах природных экосистем

Большой спектр и широкий диапазон удельной активности техногенных радионуклидов (ТРН) в разных средах определяют территорию СИП как уникальную площадку для изучения особенностей их распределения и накопления в окружающей среде в отдаленные сроки после ядерных испытаний. Результаты исследований позволили сделать вывод о том, что подвижность ТРН в почвах объектов СИП определена происхождением и условиями формирования радиоактивного загрязнения почвенного покрова [12]. В почвах СИП, независимо от происхождения радиоактивного загрязнения, радионуклиды ^{137}Cs и $^{239+240}$Pu характеризуются низкой подвижностью

Таблица 1 / Table No. 1

Верхняя граница диапазона значений удельной и поверхностной активности радионуклидов на испытательных площадках СИП [11]

The upper range of specific and surface activity of radionuclides at the STS [11]

Оцениваемая территория	Радиоэкологический параметр	Радионуклиды			
		^{137}Cs	^{90}Sr	^{241}Am	$^{239+240}$Pu
«Условно»-фоновые территории СИП*	Удельная активность, Бк/кг	200	60	30	50
	Поверхностная активность, Бк/м^2	$1{,}3*10^4$	$3{,}9*10^3$	$1{,}9*10^3$	$3{,}2*10^3$
Радиоактивные выпадения в виде следов на СИП	Удельная активность, Бк/кг	$1{,}5*10^3$	$5{,}0*10^3$	$1{,}2*10^3$	$1{,}3*10^4$
	Поверхностная активность, Бк/м^2	$8{,}3*10^5$	$3{,}3*10^5$	$7{,}8*10^4$	$8{,}3*10^5$
Пл. «Опытное поле»	Удельная активность, бк/кг	$3{,}4*10^5$	$4{,}3*10^6$	$7{,}9*10^7$	$1{,}5*10^8$
	Поверхностная активность, бк/м^2	$2{,}2*10^7$	$2{,}8*10^8$	$5{,}1*10^9$	$9{,}8*10^{10}$
Пл. «Дегелен»	Удельная активность, бк/кг	$3{,}1*10^6$	$3{,}7*10^6$	$5{,}4*10^6$	$4{,}8*10^5$
	Поверхностная активность, бк/м^2	$2{,}0*10^8$	$2{,}4*10^8$	$3{,}5*10^8$	$3{,}1*10^7$
Пл. «Балапан»	Удельная активность, бк/кг	$1{,}9*10^6$	$2{,}4*10^5$	$9{,}4*10^4$	$3{,}9*10^4$
	Поверхностная активность, бк/м^2	$1{,}2*10^8$	$1{,}6*10^7$	$6{,}1*10^6$	$2{,}5*10^6$
Пл. «Сары-Узень»	Удельная активность, бк/кг	$4{,}8*10^5$	$2{,}4*10^5$	$1{,}6*10^5$	$6{,}9*10^6$
	Поверхностная активность, бк/м^2	$3{,}1*10^7$	$1{,}6*10^7$	$1{,}0*10^7$	$4{,}5*10^8$
Пл. испытания БРВ «4» и «4А»	Удельная активность, бк/кг	$3{,}8*10^5$	$5{,}9*10^8$	$3{,}0*10^4$	$7{,}9*10^5$
	Поверхностная активность, бк/м^2	$2{,}5*10^7$	$3{,}8*10^{10}$	$1{,}9*10^6$	$5{,}1*10^7$

*В пределах границы СИП находятся значительные по площади территории, расположенные в различных частях полигона, вне границ испытательных площадок и практически не подвергшиеся значительному влиянию выпадений от испытаний на СИП. Данные территории на СИП были определены как *условно фоновые территории*

и находятся в почвах в прочносвязанной форме. При этом изотопы плутония стабильно определяются в составе органической формы, а параметры распределения варьируют, отражая различие в характере радиоактивного загрязнения почвенного покрова объектов СИП. Сравнительный анализ объектов СИП по характеру распределения форм нахождения радионуклидов в почвах выявил следующие закономерности. Наименьшей подвижностью радионуклидов характеризуются объекты, подвергшиеся радиоактивным выпадениям от наземных и экскавационного испытаний. На объектах, подвергшихся влиянию глобальных выпадений, загрязнению радиоактивными водотоками и радиоактивными веществами (площадки испытаний БРВ), подвижность ТРН заметно увеличивается. Наиболее подвижным из исследованных радионуклидов является радионуклид ^{90}Sr, параметры подвижности которого максимально отражают неоднородность характера радиоактивного загрязнения почвенного покрова объектов СИП. В зависимости от типа загрязнения доля той или иной формы может варьировать в широких пределах: медианное значение содержания водорастворимой формы ^{90}Sr варьирует от < 0,47 до 1,3%; обменной – от 0,78 до 78,8; подвижной – от 0,34 до 38,2; прочносвязанной формы – от 7,0 до 99%. На основе анализа научных данных специалистами ИРБЭ предложено использование параметров подвижности радионуклида ^{90}Sr в качестве дополнительного индикатора следов выпадений от наземных ядерных испытаний.

Исследования характера распределения радионуклидов в почвах территории СИП, не относящихся к испытательным площадкам, позволили определить характер распределения радионуклидов в вертикальном профиле почв основных подтипов и типов каштановых почв условно фоновой территории полигона. Установлено, что на условно фоновых территориях СИП радионуклиды сосредоточены в верхних слоях почвы и обнаруживаются, в основном, до глубины 15–20 см [13].

Особенности накопления ТРН в объектах экосистемы СИП являются отражением их миграционной активности в природной среде. Цезий-137, америций-241, изотопы плутония 239 и 240, обнаруживаемые в водных объектах техногенного происхождения, равномерно распределяются в средах «донные отложения-водные растения», а для систем «донные отложения – вода» и «донные отложения – прибрежные растения» они преимущественно депонированы в донных отложениях. Стронций-90 равномерно распределяется во всех компонентах системы «донные отложения – вода – растения» независимо от вида растений, что еще раз доказывает его высокую миграционную активность и биодоступность [14]. Ряд убывания радионуклидов по их способности к накоплению растениями в целом имеет следующий вид: стронций-90 > цезий-137 > америций-241 > изотопы плутония 239, 240. В исследовании выявлена специфика накопления ТРН по типам растений. В местах расположения скважин подземных ядерных испытаний на участке Сары-Узень Семипалатинского испытательного полигона показано, что прибрежно-водные растения накапливали больше ^{90}Sr, в том время как в наземных растениях преимущественно накапливались изотопы плутония $^{239+240}$Pu [15]. В работе [16] представлены материалы по использованию морфологических и анатомических особенностей растений в качестве индикативных показателей для оценки радиационной или химической природы загрязнения на территории площадки «Дегелен» СИП.

Выявлены повышенные концентрации трития в растениях, произрастающих на прилегающих территориях реки Шаган, а также по руслам пересохших ручьев, выходящих на значительные расстояния за пределы границ площадки «Дегелен», что свидетельствует о наличии радионуклида в грунтовых водах указанных территорий [17]. Установлено, что в долинах ручьев площадки уровни удельной активности трития в растениях варьируют в форме тритиевой воды (НТО) от (1,9±0,4) до (30±4) кБк/кг, а в органически связанный форме (ОСТ) концентрация трития регистрируется в диапазоне значений от (0,1±0,03) до (5,0±0,1) кБк/кг. Средние значения соотношения ОСТ/НТО для растительного покрова испытательного участка варьируют от 0,1 до 0,6, что указывает на постоянное присутствие тритиевого загрязнения [18].

Для исследования параметров перехода радионуклидов в сельскохозяйственную продукцию специалистами института реализована серия натурных экспериментов экспериментальных фермерских хозяйств, организованных на загрязненных участках территории СИП (рис. 2).

В ходе серий натурных экспериментов, проведенных на испытательной площадке «Опытное поле», получены коэффициенты накопления (Кн) радионуклидов для растениеводческой продукции (табл. 2) – [20].

Наряду с сельскохозяйственными культурами для различных участков СИП установлены Кн радионуклидов из почвы в растения естественных экосистем [21]. Наибольшие значения Кн характерны для зон радиоактивных водотоков и мест испытания БРВ. К особенностям радиоактивного загрязнения на этих площадках можно отнести высокие коэффициенты накопления ^{90}Sr растительностью. Это, в свою очередь, представляет серьезную опасность для людей и животных при их нахождении на этих территориях, что делает данные площадки одними из наиболее опасных объектов СИП в радиационном плане. Для ограничения доступа людей

Рис. 2. Экспериментальные фермерские хозяйства на территории СИП [17]
Fig. 2. Experimental fields on STS [17]

Таблица 2 /Table No. 2

Значения Кн радионуклидов из почвы в растения для растениеводческой продукции [20]

Radionuclide transfer factors from soil to plants for crop products [20]

Растениеводческая продукция	Кн			
	^{137}Cs	^{90}Sr	$^{239+240}$Pu	^{241}Am
Пшеница	$4{,}1*10^{-4}$	$2{,}6*10^{-2}$	$8{,}1*10^{-4}$	$1{,}1*10^{-3}$
Картофель (клубни)	$3{,}3*10^{-3}$	$1{,}9*10^{-2}$	$4{,}3*10^{-4}$	$1{,}1*10^{-3}$
Овощи	$1{,}1*10^{-2}$	$1{,}1*10^{-1}$	$1{,}2*10^{-3}$	$8{,}1*10^{-4}$

и животных на территорию площадки «4а» были созданы физические барьеры в виде траншей, а на участках радиоактивного загрязнения установлены знаки радиационной опасности. Тем не менее, близкое расположение радиационно опасных участков к территориям, которые могут быть переданы в хозяйственный оборот, делает приоритетным вопрос очистки данных территорий от радиоактивного загрязнения.

Переход радионуклидов в организм животных зависит: от исходных уровней содержания радионуклидов в компонентах среды их обитания, размеров загрязненных участков, форм нахождения радионуклидов в почве и jn поведенческих особенностей животных. Высокие значения удельных активностей радионуклидов в организме диких животных отмечаются при условии их непосредственного обитания на локальных участках загрязнения и малом радиусе суточной активности. Индикатором радионуклидного загрязнения биоты на площадках СИП по содержанию ^{137}Cs и ^{90}Sr может служить прыткая ящерица (*Lacerta agilis Linnaeus*) – повсеместно встречающийся вид, обитающий на испытательных площадках СИП [20]. Радиоэкологические исследования фауны полигона показывают, что основная часть дозы у представителей животного мира формируется за счет внутреннего облучения от ^{90}Sr. На примере исследования радиационного воздействия на косулю был отмечен широкий разброс дозовых нагрузок на представителей животного мира: от 3,7 мкГр/сут (условно-фоновые территории) – 150 мкГр/сут (территории следов радиоактивных выпадений) до максимально возможных доз в пределах 1,6 10^4 – 1,7 10^7 мкГр/сут на территориях испытательных площадок. Это, в свою очередь, дает исследователям возможность изучить радиобиологическое действие на биоту в широком диапазоне доз и радиобиологических эффектов вплоть до возникновения лучевой болезни с летальным исходом. По опасности рисков возникновения различных эффектов исследуемые территории можно расположить в следующем убывающем порядке: площадки испытания БРВ (4 и «4А») > пл. «Опытное поле» > пл. «Дегелен» > пл. «Балапан» > пл. «Сары-Узень» > территории радиоактивных выпадений в виде следов на СИП > территории СИП без радиоактивных выпадений в виде следов [11].

В экосистемах, сопряженных с радиоактивными водотоками, основными радионуклидами, вносящими вклад в загрязнение животных, являются ^{137}Cs и ^{3}H, а на участках испытания БРВ – ^{90}Sr. В случае с рыбой, при ее обитании в замкнутых водоемах (например, воронка от ядерного испытания), отмечаются повышенные значения удельной активности радионуклидов ^{137}Cs, ^{90}Sr и ^{3}H. Получены уникальные научные данные о распределении изотопов плутония в разных тканях рыб и других референтных животных (табл. 3, 4).

Радиоэкологические исследования в лабораторных условиях

Для детального изучения особенностей миграции радионуклидов в системе «почва-вода-воздух-растения» в стандартизованных условиях на базе института была создана экспериментальная оранжерея, оснащенная системой фитоосвещения и контроля микроклиматических условий. Созданные микроклиматические условия позволяют проводить экспериментальные работы с различными видами сельскохозяйственных растений для оценки накопления и характера распределения радионуклидов при их корневом – из загрязненных почв и воды и аэральном поступлении. В условиях модельного

Таблица 3 /Table No. 3

Относительные концентрации (концентрация в ткани / концентрация в донных отложениях) техногенных радионуклидов в тканях карпа (Cyprinus carpio) [23]

Relative concentrations (concentration in tissue / concentration in bottom sediment samples) of artificial radionuclides in carp tissues (Cyprinus carpio) [23]

Вид ткани	^{137}Cs	^{90}Sr	$^{239+240}$Pu
	Среднее арифметическое		
Мышечная ткань (филе)	0,0013	0,09	$4*10^{-5}$
Костная ткань	0,0009	2,57	$1,1*10^{-5}$

Таблица 4 /Table No. 4

Относительные концентрации (концентрация в ткани / концентрация в грунте) техногенных радионуклидов в референтных видах биоты [5]

Relative concentrations (concentration in tissue / concentration in soil samples) of artificial radionuclides in reference biota species [5]

Референтный вид биоты	Значения CR (Mean±SD)			
	^{137}Cs	^{90}Sr	^{241}Am	$^{239+240}$Pu
Куропатка (Perdix perdix)	$(3,3±2,5)*10^{-3}$	$(4,2±6,3)*10^{-4}$	$<5,9*10^{-4}$	$<1,9*10^{-5}$
Суслик (Spermophilus erythrogenys)	0,012±0,009	–	$2,5\text{-}10^{-4}$	$9,9*10^{-4}$

вегетационного эксперимента на почвенных образцах с бывших технических площадок СИП на примере культуры салата (*Lactuca sativa* L.) показано, что для миграции ^{137}Cs и ^{90}Sr в растения из почвы определяющими факторами являются содержание биологически доступных форм нахождения радионуклидов и их неизотопных аналогов K и Ca соответственно [24].

В 2019–2021 гг. была проведена серия имитационных (в камере) и натурных (на площадке «Дегелен») экспериментов по исследованию аэрального поглощения трития сельскохозяйственными культурами [25–27]. На основе полученных результатов дана сравнительная количественная оценка поглощения трития типичными культурами (салат, перец, баклажаны, томаты, подсолнечник, фасоль), выращиваемыми на всей территории Казахстана, в случае кратковременного воздействия трития [26]. Разница между концентрацией трития в свободной (тритированная вода – HTO) и в органически-связанной (органически-связанный тритий – OCT) форме составляла от одного до двух порядков в зависимости от органа и вида растений. Распределение HTO в тканях нелистовых культур в случае кратковременной аэральной экспозиции (от 6 до 8 ч) описывалось убывающим рядом: «листья < стебли < плоды». Распределение OCT по органам не имело четкой закономерности. В постэкспозиционном периоде к моменту полного созревания плодов наблюдалось значительное снижение концентрации HTO в тканях растений. Однако концентрация OCT в созревших плодах оставалась практически на том же уровне и прочно удерживалась в течение длительного времени [28]. В ходе натурных и имитационных экспериментов показано, что концентрация HTO в тканях растений коррелирует с такими факторами, как концентрация HTO в приземном воздухе (r=0,76), температура воздуха(r=0,43), относительная влажность воздуха (r=-0,43) и фотосинтетически активная радиация (r=0,56). Для OCT подобные зависимости – не установлены. Однако концентрация OCT в листьях тесно коррелирует с концентрацией OCT в стеблях (r=0,99) и плодах (r=0,98). Сравнительный анализ

показал, что в натурных условиях скорость образования ОСТ в листьях выше, чем в имитационных экспериментах (в камере) – в 15–30 раз, а перенос ОСТ в съедобную часть растений – в 2–4 раза. В работах [29, 30] представлены результаты долгосрочных пятилетних исследований биодоступности прочносвязанного трития в почве. Полевые исследования проводились в эпицентральных зонах СИП с использованием доминирующих и субдоминантных видов. Лабораторные испытания проводились в экспериментальной оранжерее с использованием различных овощных культур. Установлено, что основным фактором выщелачивания прочносвязанного трития в почве является водный режим. Концентрация трития в почвенном растворе коррелирует с влажностью почвы (r=0,47). Оценка видовых различий в лабораторных условиях показала, что корни растений способствуют мобилизации прочносвязанного трития в почве.

Результаты цитогенетических исследований влияния дозовых нагрузок на растения отражены в ряде публикаций, включая совместные исследования со специалистами Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии (ВНИИРАЭ), г. Обнинск [31–33]. Важно, что основной вклад в формирование цитогенетических эффектов у исследованных видов растений вносят двойные мосты и двойные фрагменты, что подтверждает радиационную природу наблюдаемых изменений.

Радиационная безопасность населения

Реконструкция доз облучения населения в период проведения ядерных испытаний в атмосфере в 1949–1962 гг.

Основной вклад в глобальное радиоактивное загрязнение окружающей природной среды и в дозовые нагрузки на население, безусловно, внесли атмосферные ядерные испытания. По официальным данным, суммарный тротиловый эквивалент атмосферных ядерных взрывов, проведенных на СИП, оценивается в 6,58 Мт [36].

Наиболее достоверные данные, свидетельствующие о фактах радиационного воздействия ядерных взрывов на население Казахстана и пригодные для количественных оценок этого воздействия, содержатся в архивах Минобороны и Минздрава России, а также в архивах других ведомств и учреждений, участвовавших в ядерных испытаниях. По своему содержанию эти данные представляют собой результаты измерений мощностей дозы гамма-излучения от выпавших радиоактивных продуктов вдоль траекторий перемещения радиоактивных облаков. Они получены, главным образом, с помощью авиационной гамма-съемки местности и в ряде случаев проверены прямыми измерениями наземной дозиметрической разведки. Также имеются отдельные данные о радиоактивном загрязнении почвы, травы, зерна, молока, экскрементов и т.д. [37].

Уровень радиационного воздействия конкретного взрыва на население, при прочих равных условиях, существенно зависел от мощности и высоты взрыва, времени года и метеорологических условий в период его проведения. На основании совокупности имевшихся данных был проведен отбор таких взрывов, радиационное воздействие которых на население может рассматриваться как значимое [38]. В первую группу наиболее радиационно значимых взрывов на СИП вошли шесть испытаний. Критерием отбора этих испытаний явилось условие, что эффективная доза облучения за жизнь взрослого человека, живущего за пределами полигона в месте с максимальной мощностью дозы, превысит 50 мЗв (табл. 5) – [37].

Таблица 5 / Table No. 5

Первая группа наиболее значимых взрывов на СИП

The first group of the most significant tests at the SNTS

Номер взрыва[#]	Дата взрыва	Высота над землей, м	Мощность взрыва, кт
1-й	29.08.49	30	22
2-й	24.09.51	30	38
4-й	12.08.53	30	400
18-й	30.10.54	55	10
28-й	24.08.56	93	27
148-й	07.08.62	0	9,9

Во вторую группу наиболее радиационно значимых взрывов на СИП вошли пять испытаний. Критерием отбора таких испытаний явилось условие, что эффективная доза облучения за первый год после взрыва у взрослого человека, живущего за пределами полигона в месте с максимальной мощностью дозы, превысит 5 мЗв, а эффективная доза облучения за жизнь не превысит 50 мЗв (табл. 6) – [37].

Методология, используемая для поддержки эпидемиологических исследований в Республике Казахстан, создавалась и совершенствовалась в процессе ядерных испытаний, прежде всего, для целей обеспечения радиационной безопасности населения, проживающего вблизи СИП. В основу этой методологии положен аналоговый метод, основывающийся на обобщении результатов экспериментально-теоретических исследований радиационно-физических, биологических и медицинских процессов воздействия продуктов ядерного взрыва на среду, живую природу и человека. Ее разработка проводилась совместными усилиями ученых Института биофизики и других институтов Минздрава СССР, биологами и физиками СИП, а также специалистами других ведомств и организаций, исследовавших проблемы радиационной безопасности населения при ядерных взрывах различного типа и назначения.

В разные периоды времени рядом исследователей предпринимались попытки предложить методы реконструкции доз облучения населения, проживавшего в период ядерных атмосферных испытаний вокруг СИП. Как правило, эти методы основывались на консервативных подходах, приводящих к существенному завышению доз облучения населения. Под руководством профессора К.И. Гордеева в 2001 г. вышли методические указания [39], в которых на системной научной основе были представлены модели расчета внешнего и внутреннего облучения населения, позволившие объективизировать результаты расчета доз облучения [40–42]. Дальнейшее совершенствование и развитие расчетных моделей осуществлялось в рамках совместных исследований, выполненных в 1997–2005 гг. российскими и американскими специалистами. По итогам этих исследований была разработана совместная российско-американская

Таблица 6 / Table No. 6

Вторая группа наиболее значимых взрывов на СИП

The second group of the most significant tests at the SNTS

Номер взрыва	Дата взрыва	Высота над землей, м	Мощность взрыва, кт
13-й	05.10.54	0	4
19-й	29.07.55	2,5	1,3
20-й	02.08.55	2,5	12
26-й	16.03.56	0,4	14
41-й	22.08.57	1880	520

методология реконструкции индивидуальных доз внешнего и внутреннего облучения, полученных населением в результате радиоактивных выпадений, обусловленных испытаниями ядерного оружия на СИП. Наиболее значимыми последствиями радиационного воздействия на население явились дозы внешнего облучения от радиоактивных выпадений и дозы внутреннего облучения щитовидной железы от радиоактивных изотопов йода – прежде всего ^{131}I, ^{133}I – за счет перорального поступления жителям радиоактивного йода с молоком. Подробное описание этой современной российско-американской методологии, включающей в себя сильные стороны как российской, так и американской методологии, представлено в научных публикациях [43–45].

В настоящее время при использовании этой методологии проводятся расчеты оценок индивидуальных доз облучения жителей [46, 47]. Рассчитываются дозы внешнего облучения за первый год после взрыва. При этом предполагается отсутствие защитных мер. В качестве исходных данных используются: (1) – мощность дозы на открытой местности в любой момент времени после выпадений; (2) – время начала выпадений; (3) – оценка степени фракционирования радионуклидов; (4) – параметры, определяющие характер жизнедеятельности человека в облученной когорте жителей.

Важно подчеркнуть крайнюю неравномерность формирования дозы внешнего облучения во времени. Расчеты показывают, что более 90 % дозы облучения всего тела, которая формируется на протяжении всей жизни у лиц из населения, реализуется в первый год после взрыва (выпадений). Например, для жителей Долони, подвергшихся воздействию радиоактивных выпадений, обусловленных первым ядерным испытанием 29 августа 1949 г., динамика формирования поглощенной дозы в воздухе этого населенного пункта (НП) имеет следующий вид: один день – 40% от дозы за 70 лет; три дня – 56; одна неделя – 68; один месяц – 83; три месяца – 91; шесть месяцев – 95; один год – 98%. Необходимо отметить, что расчет индивидуальной дозы внешнего облучения состоит из двух этапов. На первом этапе проводится оценка средней поглощенной дозы в воздухе в рассматриваемом НП. На втором этапе оценивается индивидуальная доза внешнего облучения, зависящая от возраста человека, режима проживания в НП и материала жилого дома и общественных зданий (школы), где проводили время жители. Поскольку персональные данные о режиме проживания населения отсутствуют, выделяются семь групп репрезентативных жителей (внутриутробный плод; новорожденный; 1–2 года; 3–7 лет; 8–12 лет; 13-17 лет; взрослые), для которых выполняются оценки индивидуализированных доз облучения.

В качестве исходных данных предпочтительно использовать результаты архивных измерений мощности дозы в рассматриваемых НП, выполненных сразу после радиоактивных выпадений. На основании результатов архивных измерений мощности дозы проводится расчет референтной мощности дозы на местности на 12 ч после ядерного испытания. Как альтернативу, в случае отсутствия архивных данных измерений мощности дозы в НП, можно использовать современные измерения плотности выпадений ^{137}Cs на участках в НП, поверхностный слой которых не был нарушен с 1949 г.

Следует констатировать, что оценки индивидуализированных доз имеют значительные неопределенности. Один из источников этой неопределенности – отсутствие среди архивных данных информации о точном месте измерения мощности дозы. Было измерение в НП или вблизи НП – неизвестно. Поэтому при расчетах принимается, что измерения выполнены в рассматриваемых НП. Верификация оценок индивидуализированных доз внешнего облучения, рассчитанных по современной методологии реконструкции индивидуальной дозы путем сравнения этих оценок с соответствующими оценками доз, основанными на измерениях электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) зубной эмали конкретных жителей, показала удовлетворительное совпадение для рассмотренной группы из 16 чел., для которых имеются ЭПР измерения. Следует отметить, что соотношение двух вариантов оценок доз, рассчитанных вышеуказанными методами, имеет лучшую корреляцию при использовании информации, полученной на основании персонального интервью [46].

Предварительный анализ результатов расчета оценок индивидуализированных доз внешнего облучения для жителей таких НП, как Долонь, Кайнар, Канонерка, Черемушки, Акбулак, Коростели, Мостик, Семиярка, Знаменка и других, показал, что эти оценки примерно в 2–5 раз ниже, чем оценки средних поглощенных доз в соответствующих НП. При этом, примерно 45–75% пожизненной дозы, которую получат жители за 70 лет проживания в данном НП, были реализованы в первые три дня, что является результатом крайней неравномерности динамики облучения жителей.

Оценка доз облучения населения, проживающего в настоящее время вблизи СИП

В результате проведения ядерных испытаний на СИП радиоактивные облака выходили за пределы полигона, что привело к радиоактивному загрязнению местности, прилегающей к полигону. Основные дозообразующие следы были направлены в северо-восточном, юго-восточном и южном направлениях. Радиоактивное загрязнение распространилось за пределы полигона на сотни километров, образуя следы шириной десятки километров.

Для определения современной радиационной обстановки в населенных пунктах: Долонь – Бескарагайский район (по данным 2015 г. население села составляло 313 чел.); Саржал – Абайский район (по данным 2015 г. – 431 чел.); Бодене – Бескарагайский район (по данным 2015 г. – 131 чел.) [9] и на прилегающих к ним территориях, подвергшихся наибольшему радиоактивному загрязнению в период проведения ядерных испытаний, проведены комплексные экологические исследования. В настоящее время среднее содержание техногенных радионуклидов в почве обследованных населенных пунктов не превышает нормативных значений, однако в ряде случаев оно выше, чем на отдельных территориях СИП. Мониторинг воздушной среды показал только присутствие радионуклида $^{239+240}Pu$, при этом его максимальная концентрация оказалась на 3–5 порядков ниже допустимых уровней. Концентрация других ТРН (^{241}Am, ^{137}Cs, ^{90}Sr) также была значительно ниже допустимой объемной активности радионуклидов в воздухе для населения [48]. Водные объекты представлены поверхностными водоемами (река Иртыш, озера и т.д.) и подземными водами, используемыми местным населением в питьевых и хозяйственных целях. Исследования состояния водных объектов показали, что, с точки зрения радионуклидного состава, вода не имеет отклонений от норм Гигиенических правил и не представляет радиационной опасности для населения. Результаты определения содержания техногенных радионуклидов ^{137}Cs, ^{241}Am, ^{90}Sr, $^{239+240}Pu$ в производимой

в селах продукции животного и сельскохозяйственного происхождения показали, что их концентрация находится на уровне <1 Бк/кг. Поэтому данная продукция по своим радиационным характеристикам никакой радиационной опасности для жителей не представляет. Однако в грибах, растущих в ленточном бору, было выявлено повышенное содержание радионуклида ^{137}Cs, достигающее 260 Бк/кг, что превышает нормативный уровень – 160 Бк/кг и требует проведения радиационного контроля лесной продукции [49]. Оценкой ожидаемых дозовых нагрузок на население, при условии наихудшего сценария – «фермер, ведущий натуральное хозяйство» – определено, что ожидаемая годовая эффективная доза на человека на данных территориях не превысит 0,3 мЗв и, согласно Гигиеническим нормативам, будет ниже уровня вмешательства [50].

В целом, радиационную обстановку на части территории, прилегающей к СИП, можно считать удовлетворительной и специальных мероприятий, направленных на снижение коллективной дозовой нагрузки на население, путем рекультивации загрязненных территорий, ограничения доступа к радиационно опасным территориям и оптимизации хозяйственной деятельности – в настоящее время проводить не требуется.

Прогнозная оценка доз облучения населения

В настоящее время дозовая нагрузка на население в случае планируемого проживания и ведения хозяйственной деятельности на территории полигона оценивается в диапазоне 0,02–8,4 мЗв ожидаемых годовых эффективных доз. Верхние границы дозового диапазона относятся к территориям вблизи испытательных площадок и территории следов радиоактивных выпадений на СИП. Наибольший вклад в дозу от искусственных радионуклидов вносит поступление радионуклидов с продуктами питания местного производства (57%), где основным дозообразующим радионуклидом является ^{90}Sr (92%) и его содержание в растениеводческой продукции. Вторым по значимости (37%) является внешнее облучение от гамма-излучения, причем 6% приходится на ингаляционный путь поступления. Вклад основных дозообразующих радионуклидов в суммарную ожидаемую годовую эффективную дозу населения при проживании на территории СИП составляет: 53% – ^{90}Sr; 40 – ^{137}Cs; 6 – $^{239+240}$Pu и 1% – ^{241}Am [9].

Исследование почвенно-растительного покрова и водных объектов территории бывшего СИП, планируемой к передаче в народнохозяйственный оборот, показало, что вода объектов водопользования СИП, отобранная на зимовках и летниках, по радионуклидному составу соответствует санитарно-эпидемиологическим требованиям к качеству питьевой воды. При этом, по химическому составу, вода объектов водопользования не соответствует требованиям гигиенических нормативов показателей безопасности хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. Около половины источников воды, используемых для хозяйственных нужд, неблагоприятны по химическому составу, прежде всего – по солености и повышенному содержанию урана. Присутствие искусственных радионуклидов в количествах, превышающих значения уровня вмешательства для питьевой воды, на условно «фоновых» территориях – не зафиксировано [51, 52].

Заключение

Специалисты Института радиационной безопасности и экологии последовательно развивают и формируют новые направления в области радиобиологических и радиоэкологических исследований, продолжая традиции ученых и специалистов Медико-биологического центра, созданного на СИП в середине прошлого века. Разработанные модели и методики, экспериментально полученные коэффициенты накопления и перехода техногенных радионуклидов в объекты природной среды имеют практическую ценность для радиоэкологического мониторинга, восстановления загрязненных территорий и разработки нормативных актов в сфере радиационной безопасности. Накопленные данные и технологические решения позволяют перейти от описательной радиоэкологии к системной оценке рисков и моделированию радиационно-экологической безопасности.

Авторы выражают благодарность специалистам Института радиационной безопасности и экологии (ИРБЭ) в г. Курчатов (Республика Казахстан) – филиала Национального ядерного центра Республики Казахстан А.О. Айдарханову, Н.В. Ларионовой, А.В. Паницкому, Е.Н. Поливкиной, главному научному сотруднику ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального Исследовательского Центра «Курчатовский Институт» С.Н.Лукашенко, принявшим участие в обсуждении рукописи статьи, за высказанные ими ценные замечания и предложения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Кудрявцев П.Г.* Семипалатинский ядерный полигон – вчера, сегодня, завтра // Вестник Пермского научного центра УрО РАН. 2010. №1. С. 52-62.

2. Central Media 24/7: Зона отчуждения: какие земли Семипалатинского ядерного полигона планируют вернуть в хозоборот. 2025. Электронный ресурс: https://centralmedia24.kz/zona-otchuzhdeniya-kakie-zemli-semipalatinskogo-yadernogo-poligona-planiruyut-vernut-v-hozoborot/.

3. Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана. Оптимизация исследований территорий Семипалатинского испытательного полигона с целью их передачи в хозяйственный оборот. Выпуск 5 / Под рук. Лукашенко С.Н. Павлодар: Дом печати, 2015. 324 с.

4. *Лукашенко С.Н., Эдомская М.А.* Плутоний в окружающей среде: источники, механизмы распространения, концентрации // Радиационная биология. Радиоэкология. 2021. Т.61. №4. С. 394-424.

5. Семипалатинский испытательный полигон. Современное состояние. Павлодар: Дом печати, 2017. 52 с. ISBN 978-

REFERENCES

1. Kudryavtsev P.G. Semipalatinsk Nuclear Test Site – Yesterday, Today, Tomorrow. *Vestnik Permskogo Nauchnogo Tsentra UrO RAN* = Perm Federal Research Centre Journal. 2010;1:52-62 (In Russ.).

2. Central Media 24/7: *Zona Otchuzhdeniya: Kakiye Zemli Semipalatinskogo Yadernogo Poligona Planiruyut Vernut' v Khozoborot (2025)* = Exclusion Zone: Which Lands of the Semipalatinsk Nuclear Test Site are Planned to Be Returned to Economic Circulation (2025) (In Russ.). URL: https://centralmedia24.kz/zona-otchuzhdeniya-kakie-zemli-semipalatinskogo-yadernogo-poligona-planiruyut-vernut-v-hozoborot/.

3. *Aktual'nyye Voprosy Radioekologii Kazakhstana. Optimizatsiya Issledovaniy Territoriy Semipalatinskogo Ispytatel'nogo Poligona s Tsel'yu ikh Peredachi v Khozyaystvennyy Oborot* = Current Issues of Radioecology in Kazakhstan. Optimization of Research of the Territories of the Semipalatinsk Test Site with the Aim of Their Transfer to Economic Circulation. Issue 5. Under the Supervision of S.N. Lukashenko. Pavlodar, Dom Pechati Publ., 2015. 324 p. (In Russ.).

4. Lukashenko S.N., Edomskaya M.A. Plutonium in the Environment: Sources, Propagation Mechanisms, and Concentrations. *Radiatsionnaya Biologiya. Radioekologiya* = Radiation Biology. Radioecology. 2021;61;4:394-424 (In Russ.).

601-7844-45-5. Электронный ресурс: https://elib.biblioatom.ru/text/semipalatinskiy-poligon-sovremennoe-sostoyanie_2017/p0a/.

6. *Осинцев А.Ю., Нефедов Р.А.* О характере поверхностного загрязнения искусственными радионуклидами испытательной площадки 4 и 4"А", расположенных в пределах Семипалатинского испытательного полигона // Современные проблемы науки и образования. 2014. №2. Ст. 12053. Электронный ресурс: https://science-education.ru/ru/article/view?id=12753 (Дата обращения: 16.12.2025).

7. Человек. Энергия. Атом: Электронный журнал. 2024. Т.42. №2. С. 91. Электронный ресурс: https://www.nnc.kz/media/hea/files/e2AtQPTf0b.pdf .

8. *Топорова А.В., Монаенко В.Н., Бакланова Ю.В.* и др. Разработка приложения для оценки дозовых нагрузок на население в случае проживания и ведения деятельности на территории Семипалатинского испытательного полигона // Вестник Национального ядерного центра Республики Казахстан. 2024. №2. С. 178-184.

9. *Батырбеков Э.Г., Айдарханов А.О., Витюк В.А.* и др. Комплексное радиоэкологическое обследование Семипалатинского испытательного полигона: Монография. Курчатов: Институт радиационной безопасности и экологии РГП НЯЦ, 2021. 340 с.

10. *Андрианова И.Е., Рождественский Л.М., Ефимова И.Л.* На Семипалатинском полигоне. Воспоминания очевидцев (к 75-летию со дня взрыва первой советской атомной бомбы) // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2024. Т.69. №6. С. 27–32. Doi: 10.33266/1024-6177-2024-69-6-27-32.

11. *Паницкий А.В., Байгазы С.А., Александрович И.А.* Оценка радиоэкологических рисков для косули сибирской (Capreolus pygargus Pal., 1771), обитающей в естественных условиях на территории Семипалатинского испытательного полигона // Вестник НЯЦ РК. 2025. №3. С. 201-210.

12. *Kunduzbayeva A.Ye., Lukashenko S.N., Kabdyrakova A.M., Larionova N.V., Magasheva R.Yu., Bakirova G.A.* Speciation of ^{137}Cs, ^{90}Sr, ^{241}Am, and $^{239+240}$Pu Artificial Radionuclides in Soils at the Semipalatinsk Test Site // Journal of Environmental Radioactivity. 2022. V. 249. No.1–2. P. 106867.

13. *Паницкий А.В., Лукашенко С.Н., Магашева Р.Ю.* Особенности вертикального распределения радионуклидов в почвах условно-чистой территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона // Радиационная биология. Радиоэкология. 2016. Т.56. №6. С. 623-638.

14. *Айдарханова А.К., Ларионова Н.В., Дашук А.Л.* Перераспределение радионуклидов в водных объектах техногенного происхождения Семипалатинского испытательного полигона // Вестник Национального ядерного центра Республики Казахстан. 2019. №3. С. 147-155.

15. Krivitskiy P., Larionova N., Toporova A., Aidarkhanova A., Monayenko V., Kunduzbayeva A., Kabdyrakova A., Polevik V., Aidarkhanov A. Accumulation of Artificial Radionuclides in Vegetation Cover in the Area of Underground Nuclear Tests Locations in the Sary-Uzen Site of the Semipalatinsk Test Site // Journal of Hazardous Materials. 2026. No.502. P. 141010.

16. *Yankauskas A., Larionova N., Shatrov A., Toporova A.* The Effect of Radionuclide and Chemical Contamination on Morphological and Anatomical Parameters of Plants // Plants. 2024. No.13. P. 2860.

17. *Larionova N.V., Lukashenko S.N., Lyakhova O.N., Aidarkhanov A.O., Subbotin S.B., Yankauskas A.B.* Plants as Indicators of Tritium Concentration in Ground Water at the Semipalatinsk Test Site // Journal of Environmental Radioactivity. 2017. V.177. P. 218-224.

18. *Polivkina Ye.N., Larionova N.V., Lukashenko S.N.,* et al. Assessment of the Tritium Distribution in the Vegetation Cover in the Areas of Underground Nuclear Explosions at the Semipalatinsk Test Site // Journal of Environmental Radioactivity. 2021. V.237. P. 67-85.

19. Институт радиационной безопасности и экологии: Научно-популярное издание. Павлодар: Дом Печати, 2016. 48 с. ISBN 978-601-7112-080-0.

20. *Kozhakhanov T.E., Lukashenko S.N., Larionova N.V.* Accumulation of Arti cial Radionuclides in Agricultural Plants in the Area Used for Surface Nuclear Tests // Journal of Environmental Radioactivity. 2014. V.137. P. 217–226.

21. *Larionova N.V., Lukashenko S.N., Kabdyrakova A.M., Kunduzbayeva A.Ye., Panitskiy A.V., Ivanova A.R.* Transfer of Radionuclides to Plants of Natural Ecosystems at the Semipalatinsk Test Site // Journal of Environmental Radioactivity. 2018. V.186. P. 63-70.

22. *Паницкий А.В., Айдарханов А.О., Кадырова Н.Ж.* Оценка дозовых нагрузок у природных популяций ящериц,

5. Semipalatinskiy Ispytatel'nyy poligon. Sovremennoye Sostoyaniye = Semipalatinsk Test Site. Current Status. Pavlodar, Dom Pechati Publ., 2017. 52 p. (In Russ.). ISBN 978-601-7844-45-5. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/semipalatinskiy-poligon-sovremennoe-sostoyanie_2017/p0a/.

6. Osintsev A.Yu., Nefedov R.A. On the Nature of Surface Contamination with Artificial Radionuclides at Test Sites 4 and 4A Located within the Semipalatinsk Test Site. *Sovremennyye Problemy Nauki i Obrazovaniya* = Modern Problems of Science and Education. 2014;2:Art.12753 (In Russ.). URL: https://science-education.ru/ru/article/view?id=12753 (Date of Access: 12/16/2025).

7. Chelovek. Energiya. Atom = Man. Energy. Atom. 2024;42;2:91 (In Russ.). URL: https://www.nnc.kz/media/hea/files/e2AtQPTf0b.pdf .

8. Toporova A.V., Monayenko V.N., Baklanova Yu.V., et al. Development of an Application for Assessing Dose Loads on the Population in Case of Residence and Activities on the Territory of the Semipalatinsk Test Site. *Vestnik Natsional'nogo Yadernogo Tsentra Respubliki Kazakhstan* = Bulletin of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan. 2024;2:178-184 (In Russ.).

9. Batyrbekov E.G., Aydarkhanov A.O., Vityuk V.A., et al. *Kompleksnoye Radioekologicheskoye Obsledovaniye Semipalatinskogo Ispytatel'nogo Poligona* = Comprehensive Radioecological Survey of the Semipalatinsk Test Site. Monograph. Kurchatov, Institut Radiatsionnoy Bezopasnosti i Ekologii RGP NYATS Publ., 2021. 340 p. (In Russ.).

10. Andrianova I.Ye., Rozhdestvenskiy L.M., Yefimova I.L. At the Semipalatinsk Test Site. Eyewitness Accounts (on the 75th Anniversary of the Explosion of the First Soviet Atomic Bomb). *Meditsinskaya Radiologiya i Radiatsionnaya Bezopasnost'* = Medical Radiology and Radiation Safety. 2024;69;6:27-32 (In Russ.). Doi: 10.33266/1024-6177-2024-69-6-27-32.

11. Panitskiy A.V., Baygazy S.A., Aleksandrovich I.A. Assessment of Radioecological Risks for Siberian Roe Deer (Capreolus Pygargus Pal., 1771) Living in Natural Conditions on the Territory of the Semipalatinsk Test Site. *Vestnik NYATS RK* = NNC RK Bulletin. 2025;3:201-210 (In Russ.).

12. Kunduzbayeva A.Ye., Lukashenko S.N., Kabdyrakova A.M., Larionova N.V., Magasheva R.Yu., Bakirova G.A. Speciation of ^{137}Cs, ^{90}Sr, ^{241}Am, and $^{239+240}$Pu Artificial Radionuclides in Soils at the Semipalatinsk Test Site. Journal of Environmental Radioactivity. 2022;249;1–2:106867.

13. Panitskiy A.V., Lukashenko S.N., Magasheva R.Yu. Features of the Vertical Distribution of Radionuclides in Soils of the Conditionally Clean Territory of the Former Semipalatinsk Test Site. *Radiatsionnaya Biologiya. Radioekologiya* = Radiation Biology. Radioecology. 2016;56;6:623–638 (In Russ.).

14. Aydarkhanova A.K., Larionova N.V., Dashuk A.L. Redistribution of Radionuclides in Water Bodies of Technogenic Origin of the Semipalatinsk Test Site. *Vestnik Natsional'nogo Yadernogo Tsentra Respubliki Kazakhstan* = Bulletin of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan. 2019;3:147-155 (In Russ.).

15. Krivitskiy P., Larionova N., Toporova A., Aidarkhanova A., Monayenko V., Kunduzbayeva A., Kabdyrakova A., Polevik V., Aidarkhanov A. Accumulation of Artificial Radionuclides in Vegetation Cover in the Area of Underground Nuclear Tests Locations in the Sary-Uzen Site of the Semipalatinsk Test Site. Journal of Hazardous Materials. 2026;502:141010.

16. Yankauskas A., Larionova N., Shatrov A., Toporova A. The Effect of Radionuclide and Chemical Contamination on Morphological and Anatomical Parameters of Plants. Plants. 2024;13:2860.

17. Larionova N.V., Lukashenko S.N., Lyakhova O.N., Aidarkhanov A.O., Subbotin S.B., Yankauskas A.B. Plants as Indicators of Tritium Concentration in Ground Water at the Semipalatinsk Test Site. Journal of Environmental Radioactivity. 2017;177:218-224

18. Polivkina Ye.N., Larionova N.V., Lukashenko S.N., et al. Assessment of the Tritium Distribution in the Vegetation Cover in the Areas of Underground Nuclear Explosions at the Semipalatinsk Test Site. Journal of Environmental Radioactivity. 2021;237:67-85.

19. *Institut Radiatsionnoy Bezopasnosti i Ekologii* = Institute of Radiation Safety and Ecology. Popular Science Publication. Pavlodar, Dom Pechati Publ., 2016. 48 p. (In Russ.). ISBN 978-601-7112-080-0

20. Kozhakhanov T.E., Lukashenko S.N., Larionova N.V. Accumulation of Arti cial Radionuclides in Agricultural Plants in the Area Used for Surface Nuclear Tests. Journal of Environmental Radioactivity. 2014;137:217–226.

21. Larionova N.V., Lukashenko S.N., Kabdyrakova A.M., Kunduzbayeva A.Ye., Panitskiy A.V., Ivanova A.R. Transfer of Radionuclides to Plants of Natural Ecosystems at the Semipalatinsk Test Site. Journal of Environmental Radioactivity. 2018;186:63-70.

22. Panitskiy A.V., Aydarkhanov A.O., Kadyrova N.Zh. Assessment of Radiation Doses in Natural Populations of Lizards Living in Natural Conditions at the Technical Sites of the Semipalatinsk Test Site. *Vestnik Natsional'nogo Yadernogo Tsentra Respubliki Kazakhstan* = Bulletin of

обитающих в естественных условиях на технических площадках Семипалатинского полигона // Вестник Национального ядерного центра Республики Казахстан. 2024. №3. С. 144-152.

23. *Panitskiy A.V., Baigazinov Z., Baigazy S.A., Alexandrovich I.A., Polivkina Y.N., Salmenbayev S.E., Kozhabekova A.R., Mukhamediyarov N.Zh., Adjei-Kyereme S., Heged s M., Kov cs T.* Assessment of ^{137}Cs, ^{90}Sr, ^{241}Am, $^{239+240}$Pu, 3H (HTO, OBT) in the Fish from Lakes, Rivers, and Nuclear Shell Craters of the Semipalatinsk Test Site // Scientific Reports. 2026. No.16. P. 1802.

24. *Поливкина Е.Н., Пономарева Т.С., Меньдубаев А.Т.* и др. Накопление ^{137}Cs и ^{90}Sr культурой салата (Lactuca Sativa L.) на почвах радиоактивно загрязнённых участков бывшего Семипалатинского испытательного полигона // Радиация и риск. 2022. Т.31. №4. С. 94-106.

25. *Поливкина Е.Н., Ларионова Н.В., Ляхова О.Н.* Оценка аэрального поглощения НТО культурой Helianthus Annuus в условиях Семипалатинского испытательного полигона // Радиация и риск. 2020. Т.29. №1. С. 79–89.

26. *Поливкина Е.Н., Сысоева Е.С., Субботина Л.Ф., Жамалдинов Ф.Ф., Романенко Е.В., Паницкий А.В., Кенжина Л.Б.* Инкорпорирование трития овощными культурами перца и баклажана // Радиационная гигиена. 2022. Т.15. № 4. С. 97–105.

27. *Polivkina Y., Syssoyeva Y., Ivanova O., Panitskiy A., Kenzhina L., Monaenko V.* Tritium Uptake in Crops in the Area with a High Level of Atmospheric Tritium Oxide in the Territory of the Former Semipalatinsk Test Site // PLoS ONE. 2024. No.19. P. 19.

28. *Поливкина Е.Н., Сысоева Е.С., Субботина Л.Ф., Жамалдинов Ф.Ф., Романенко Е.В., Паницкий А.В., Кенжина Л.Б.* Инкорпорирование трития овощными культурами перца и баклажана // Радиационная гигиена. 2022. Т.15. №4. С. 97–105.

29. *Поливкина Е.Н., Ларионова Н.В., Тимонова Л.В., Сысоева Е.С., Паницкий А.В.* Поглощение прочносвязанного трития растениями // Вестник Национального ядерного центра Республики Казахстан. 2024. Вып.1. №97. С.104-107. Doi: 10.52676/1729-7885-2024-1-104-107.

30. *Polivkina E., Timonova L., Romanenko Ye., Lukashenko S., Panitskiy A.* Assessment of Bioavailability of Tightly Bound Tritium in Soil of the Semipalatinsk Test Site // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2025. No.303. P.118977.

31. *Minkenova K., Serik A., Panitskiy A.* Cytogenetic Changes in Rosa Spinosissima l. and leymus Angustus (Trin.) Pilg., Growing under Radioactive Contamination Conditions at the Semipalatinsk Nuclear Test Site // PLoS ONE. 2025. V.20. No.5. P. e0324860.

32. *Минкенова К.С., Мукушева М.К., Гераськин С.А.* Цитогенетические эффекты в популяции житняка гребневидного (Agropyron Cristatum L.) с площадки, где проводили испытания боевых радиоактивных веществ на Семипалатинском испытательном полигоне // Радиационная биология. Радиоэкология. 2025. Т.65. №3. С. 335-348.

33. *Geras'kin S.A., Minkenova K., Perevolotsky A.* Threshold Dose Rates for the Cytogenetic Effects in Crested Hairgrass Populations from the Semipalatinsk Nuclear Test Site, Kazakhstan // Journal of Hazardous Materials. 2021. Vol.416. No.125817. P. 1-9.

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

35. *Андрюшин И.А., Богдан В.В., Ващинкин С.А.* и др. Испытания ядерного оружия и ядерные взрывы в мирных целях СССР 1949-1990 гг. / Под ред. Михайлова В.Н. Саров: Министерство по атомной энергии РФ, 1996. 66 с.

36. *Дубасов Ю.В., Зеленцов С.А.,* Красилов *Г.А.* и др. Хронология ядерных испытаний в атмосфере на Семипалатинском полигоне и их радиационная характеристика // Вестник научной программы «Семипалатинский полигон. Алтай». 1992. №4. С. 5-11.

37. *Gordeev K., Vasilenko I., Lebedev A.,* et al. Fallout from Nuclear Tests: Dosimetry in Kazakhstan // Radiat Environ Biophys. 2002. No.41. P. 61-67.

38. *Shinkarev S.M.* Overview of the Nuclear Tests Conducted at the Semipalatinsk Nuclear Test Site and Archival Data that Can Be Used for Retrospective Dosimetry // Historical Review of Nuclear Disasters during the Process of Nuclear Development Program by the Former USSR. Proceedings. Ed. Imanaka T. Kyoto: Research Reactor Institute, 2013. P. 63-82.

39. *Гордеев К.И., Василенко И.Я., Ильин Л.А.* и др. Оценка поглощенных и эффективных доз ионизирующих излучений у населения, постоянно проживающего на радиоактивных

the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan. 2024;3:144-152 (In Russ.).

23. Panitskiy A.V., Baigazinov Z., Baigazy S.A., Alexandrovich I.A., Polivkina Y.N., Salmenbayev S.E., Kozhabekova A.R., Mukhamediyarov N.Zh., Adjei Kyereme S., Heged s M., Kov cs T. Assessment of ^{137}Cs, ^{90}Sr, ^{241}Am, $^{239+240}$Pu, 3H (HTO, OBT) in the Fish from Lakes, Rivers, and Nuclear Shell Craters of the Semipalatinsk Test Site. Scientific Reports. 2026;16:1802.

24. Polivkina Ye.N., Ponomareva T.S., Men'dubayev A.T., et al. Accumulation of ^{137}Cs and ^{90}Sr by Lettuce (Lactuca Sativa L.) in Soils of Radioactively Contaminated Sites of the Former Semipalatinsk Test Site. *Radiatsiya i Risk* = Radiation and Risk. 2022;31;4:94-106 (In Russ.).

25. Polivkina Ye.N., Larionova N.V., Lyakhova O.N. Assessment of Aerial Absorption of HTO by Helianthus Annuus under Conditions of the Semipalatinsk Test Site. *Radiatsiya i Risk* = Radiation and Risk. 2020;29;1:79-89 (In Russ.).

26. Polivkina Ye.N., Sysoyeva Ye.S., Subbotina L.F., Zhamaldinov F.F., Romanenko Ye.V., Panitskiy A.V., Kenzhina L.B. Tritium Incorporation by Vegetable Crops of Pepper and Eggplant. *Radiatsionnaya Gigiyena* = Radiation Hygiene. 2022;15;4:97–105 (In Rus.).

27. Polivkina Y., Syssoyeva Y., Ivanova O., Panitskiy A., Kenzhina L., Monaenko V. Tritium Uptake in Crops in the Area with a High Level of Atmospheric Tritium Oxide in the Territory of the Former Semipalatinsk Test Site. PLoS ONE. 2024;19:19.

28. Polivkina Ye.N., Sysoyeva Ye.S., Subbotina L.F., Zhamaldinov F.F., Romanenko Ye.V., Panitskiy A.V., Kenzhina L.B. Tritium Incorporation by Vegetable Crops of Pepper and Eggplant. *Radiatsionnaya Gigiyena* = Radiation Hygiene. 2022;15;4:97-105.

29. Polivkina Ye.N., Larionova N.V., Timonova L.V., Sysoyeva Ye.S., Panitskiy A.V. Absorption of Tightly Bound Tritium by Plants. *Vestnik Natsional'nogo Yadernogo Tsentra Respubliki Kazakhstan* = Bulletin of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan. 2024;1;97:104-107 (In Russ.). Doi: 10.52676/1729-7885-2024-1-104-107.

30. Polivkina E., Timonova L., Romanenko Ye., Lukashenko S., Panitskiy A. Assessment of Bioavailability of Tightly Bound Tritium in Soil of the Semipalatinsk Test Site. Ecotoxicology and Environmental Safety. 2025;303:118977.

31. Minkenova K., Serik A., Panitskiy A. Cytogenetic Changes in Rosa Spinosissima l. and leymus angustus (Trin.) Pilg., Growing under Radioactive Contamination Conditions at the Semipalatinsk Nuclear Test Site. PLoS ONE. 2025;20;5:e0324860.

32. Minkenova K.S., Mukusheva M.K., Geras'kin S.A. Cytogenetic Effects in the Population of Crested Wheatgrass (Agropyron Cristatum L.) from the Site where Military Radioactive Substances were Tested at the Semipalatinsk Test Site. *Radiatsionnaya Biologiya. Radioekologiya* = Radiation Biology. Radioecology. 2025;65;3:335-348 (In Russ.).

33. Geras'kin S.A., Minkenova K., Perevolotsky A. Threshold Dose Rates for the Cytogenetic Effects in Crested Hairgrass Populations from the Semipalatinsk Nuclear Test Site, Kazakhstan. Journal of Hazardous Materials. 2021;416;125817:1-9.

34. Geras'kin S.A., Minkenova K.S., Perevolotskaya T.V., Perevolotskiy A.N. Cytogenetic Effects in Populations of Feather Grass from the Territory of the Semipalatinsk Test Site. *Radiatsionnaya Biologiya. Radioekologiya* = Radiation Biology. Radioecology. 2022;62;6:642-658 (In Russ.).

35. Andryushin I.A., Bogdan V.V., Vashchinkin S.A., et al. *Ispytaniya Yadernogo Oruzhiya i Yadernyye Vzryvy v Mirnykh Tselyakh SSSR 1949-1990* = Nuclear Weapons Tests and Nuclear Explosions for Peaceful Purposes in the USSR 1949-1990. Ed. Mikhaylov V.N. Sarov, Ministerstvo po Atomnoy Energii Publ., 1996. 66 p. (In Russ.).

36. Dubasov Yu.V., Zelentsov S.A., Krasilov G.A., et al. Chronology of Atmospheric Nuclear Tests at the Semipalatinsk Test Site and their Radiation Characteristics. *Vestnik Nauchnoy Programmy Semipalatinskiy Poligon Altay* = Bulletin of the Semipalatinsk Test Site Altai Scientific Program. 1992;4:5-11 (In Russ.).

37. Gordeev K., Vasilenko I., Lebedev A., et al. Fallout from Nuclear Tests: Dosimetry in Kazakhstan. Radiat Environ Biophys. 2002;41:61-67.

38. Shinkarev S.M. Overview of the Nuclear Tests Conducted at the Semipalatinsk Nuclear Test Site and Archival Data that can be Used for Retrospective Dosimetry. Historical Review of Nuclear Disasters during the Process of Nuclear Development Program by the Former USSR. Proceedings. Ed. Imanaka T. Kyoto, Research Reactor Institute, 2013. P. 63-82.

39. Gordeyev K.I., Vasilenko I.YA., Il'in L.A., et al. *Otsenka Pogloshchennykh i Effektivnykh Doz Ioniziruyushchikh Izlucheniy u Naseleniya, Postoyanno Prozhivayushchego na Radioaktivnykh Sledakh Atmosfernykh Yadernykh Vzryvov* = Assessment of Absorbed and Effective Doses of Ionizing Radiation in the Population Permanently

следах атмосферных ядерных взрывов: Методические указания МУ 2.6.1.1001-2000. М.: Минздрав России, 2001. 112 с.

40. *Gordeev K., Shinkarev S., Ilyin L.,* et al. Retrospective Dose Assessment for the Population Living in Areas of Local Fallout from the Semipalatinsk Nuclear Test Site. Part I: External Exposure // J. Radiat. Res. 2006. Suppl.47. P. A129-A136.

41. *Gordeev K., Shinkarev S., Ilyin L.,* et al. Retrospective Dose Assessment for the Population Living in Areas of Local Fallout from the Semipalatinsk Nuclear Test Site. Part II: Internal Exposure to Thyroid // J. Radiat. Res. 2006. Suppl.47. P. A137-A141.

42. *Simon S., Beck H., Gordeev K.,* et al. External Dose Estimates for Dolon Village: Application of the U.S.: Russian Joint Methodology // J. Radiat. Res. 2006. Suppl 47. P. A143-A147.

43. *Simon S.L., Bouville A., Beck H.L.,* et al. Dose Estimation for Exposure to Radioactive Fallout from Nuclear Detonations // Health Phys. 2022. No.122. P. 1–20.

44. Beck H.L, Bouville A., Simon S.L., et al. A Method for Estimating the Deposition Density of Fallout on the Ground and on Vegetation from a Low-Yield, Low-Altitude Nuclear Detonation // Health Phys. 2022. No.122. P. 21–53.

45. *Bouville A., Beck H.L., Anspaugh L.R.,* et al. A Methodology for Estimating External Doses to Individuals and Populations Exposed to Radioactive Fallout from Nuclear Detonations // Health Phys. 2022. No.122. P. 54–83.

46. Stepanenko V., Shinkarev S., Kaprin A., et al. Comparison of External Dose Estimates Using Different Retrospective Dosimetry Methods in the Settlements Located Nearby Semipalatinsk Nuclear Test Site, Republic of Kazakhstan // J. Radiat. Res. 2024. V.65. No.17. P. 36-46.

47. *Stepanenko V., Shinkarev S., Lipikhina A.,* et al. External Radiation Dose Reconstruction for Settlements Near the Semipalatinsk Nuclear Test Site, Kazakhstan, in the International Multicenter Study: a Detailed Review and Comparative Analysis of the Initial Data // J. Radiat. Res. 2025. V.66. No.5. P. 496-508.

48. *Круглыхин А.А., Ляхова О.Н., Турченко Д.В.* и др. Уровни радиоактивного загрязнения воздушной среды на следах радиоактивных выпадений от ядерных испытаний на СИП (1949, 1951 и 1953 гг.) // Вестник Национального ядерного центра Республики Казахстан. 2018. №4. С. 165-170.

49. *Шевченко Ю.С., Ларионова Н.В., Полевик В.В., Топорова А.В., Айдарханов А.О.* Содержание радионуклидов в грибах в зоне влияния Семипалатинского испытательного полигона // Вестник Национального ядерного центра Республики Казахстан. 2020. №2. С. 87-92.

50. Гигиенические нормативы к обеспечению радиационной безопасности в Республике Казахстан: приказ Министра здравоохранения от 2 августа 2022 г. № Р ДСМ-71. Последние изменения внесены 5 мая 2025 г.

51. *Есильканов Г., Дюсембаева М., Рихванов Л., Мухамедияров Н., Ташекова А.* Эколого-геохимические особенности подземных вод Семипалатинского испытательного полигона // Экология и промышленность России. 2020. Т.24. №11. С. 30-35.

52. *Айдарханова А.К., Ларионова Н.В., Мамырбаева А.С.* и др. Перераспределение радионуклидного загрязнения в природных озерах территории Семипалатинского испытательного полигона // Современные проблемы радиобиологии-2021: Матер. Междунар. научной конф. Гомель, 23–24 сентября 2021 г. Минск: Информационно-вычислительный центр Минфина Республики Беларусь, 2021. С. 12-15.

Residing in the Radioactive Traces of Atmospheric Nuclear Explosions. Methodological Guidelines MU 2.6.1.1001-2000. Moscow, Ministry of Health of the Russian Federation Publ., 2001. 112 p. (In Russ.).

40. Gordeev K., Shinkarev S., Ilyin L., et al. Retrospective Dose Assessment for the Population Living in Areas of Local Fallout from the Semipalatinsk Nuclear Test Site. Part I: External Exposure. J. Radiat. Res. 2006;47:A129-A136.

41. Gordeev K., Shinkarev S., Ilyin L., et al. Retrospective Dose Assessment for the Population Living in Areas of Local Fallout from the Semipalatinsk Nuclear Test Site. Part II: Internal Exposure to Thyroid. J. Radiat. Res. 2006;47:A137-A141.

42. Simon S., Beck H., Gordeev K., et al. External Dose Estimates for Dolon Village: Application of the U.S. Russian Joint Methodology. J. Radiat. Res. 2006;47:A143-A147.

43. Simon S.L., Bouville A., Beck H.L., et al. Dose Estimation for Exposure to Radioactive Fallout from Nuclear Detonations. Health Phys. 2022;122:1-20.

44. Beck H.L, Bouville A., Simon S.L., et al. A Method for Estimating the Deposition Density of Fallout on the Ground and on Vegetation from a Low-Yield, Low-Altitude Nuclear Detonation. Health Phys. 2022;122:21–53.

45. Bouville A., Beck H.L., Anspaugh L.R., et al. A Methodology for Estimating External Doses to Individuals and Populations Exposed to Radioactive Fallout from Nuclear Detonations. Health Phys. 2022;122:54–83.

46. Stepanenko V., Shinkarev S., Kaprin A., et al. Comparison of External Dose Estimates using Different Retrospective Dosimetry Methods in the Settlements Located Nearby Semipalatinsk Nuclear Test Site, Republic of Kazakhstan. J. Radiat. Res. 2024;65;17:36-46.

47. Stepanenko V., Shinkarev S., Lipikhina A., et al. External Radiation Dose Reconstruction for Settlements Near the Semipalatinsk Nuclear Test Site, Kazakhstan, in the International Multicenter Study: a Detailed Review and Comparative Analysis of the Initial Data. J. Radiat. Res. 2025;66;5:496-508.

48. Kruglykhin A.A., Lyakhova O.N., Turchenko D.V., et al. Levels of Radioactive Contamination of the Air Based on Traces of Radioactive Fallout from Nuclear Tests at the Semipalatinsk Test Site (1949, 1951, and 1953). *Vestnik Natsional'nogo Yadernogo Tsentra Respubliki Kazakhstan* = Bulletin of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan. 2018;4:165-170 (In Russ.).

49. Shevchenko Yu.S., Larionova N.V., Polevik V.V., Toporova A.V., Aydarkhanov A.O. The Content of Radionuclides in Mushrooms in the Influence Zone of the Semipalatinsk Test Site. *Vestnik Natsional'nogo Yadernogo Tsentra Respubliki Kazakhstan* = Bulletin of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan. 2020;2:87-92 (In Russ.).

50. Hygienic Standards for Ensuring Radiation Safety in the Republic of Kazakhstan: Order of the Minister of Health dated August 2, 2022 No. KR DSM-71. Last amended on May 5, 2025 (In Russ.).

51. Yesil'kanov G., Dyusembayeva M., Rikhvanov L., Mukhamediyarov N., Tashekova A. Ecological and Geochemical Features of Groundwater of the Semipalatinsk Test Site. *Ekologiya i Promyshlennost' Rossii* = Ecology and Industry of Russia. 2020;24;11:30-35 (In Russ.).

52. Aydarkhanova A.K., Larionova N.V., Mamyrbayeva A.S., et al. Redistribution of Radionuclide Contamination in Natural Lakes of the Semipalatinsk Test Site. *Sovremennyye Problemy Radiobiologii* = Modern Problems of Radiobiology-2021. Proceedings of the International Scientific Conference. Gomel, September 23-24, 2021. Minsk Publ., 2021. P. 12-15 (In Russ.).

Материал поступил в редакцию 17.02.26; статья принята после рецензирования 15.06.26; статья принята к публикации 16.09.26
The material was received 17.02.26; the article after peer review procedure 15.06.26; the Editorial Board accepted the article for publication 16.09.26