

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Всероссийский научно-исследовательский институт
радиологии и агроэкологии»
(ФГБНУ ВНИИРАЭ)



**XLV РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ЧТЕНИЯ,
ПОСВЯЩЕННЫЕ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОМУ ЧЛЕНУ ВАСХНИЛ
В.М. КЛЕЧКОВСКОМУ**

(30 ноября 2016 года, ФГБНУ ВНИИРАЭ, Обнинск)

Под редакцией
академика РАН Р.М. Алексахина

Обнинск - 2016

УДК 574:577.346
ББК 28.081:28.077
С 65

С 65 **XLV Радиоэкологические чтения, посвященные действительному члену ВАСХНИЛ В.М. Клечковскому** / Под ред. акад. РАН Р.М. Алексахина. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2016. – 95 с.

The XLV Radioecological Readings dedicated to the memory of full member of VASHNIL V.M. Klechkovsky / Ed. by R.M. Alexakhin. Obninsk: RIRAE, 2016.- 95 P.

ISBN 978-5-903386-45-1

Тема XLV Радиоэкологических чтений, посвящённых действительному члену ВАСХНИЛ, доктору химических наук, профессору В.М. Клечковскому - «Решение современных радиоэкологических проблем Семипалатинского испытательного полигона», связана с наличием большого объема современных данных о радиационной обстановке на территории СИП.

Учеными Республики Казахстан совместно с международным научным сообществом выявлены все значимые участки радиоактивного загрязнения, основные пути и механизмы текущего и потенциального распространения радиоактивных веществ, включая радиационно-гигиенические последствия атмосферных ядерных испытаний; радиоактивное загрязнение бывшей испытательной площадки СИП; проблемы, связанные с всевозрастающим количеством трития, поступающего в окружающую среду с радиоактивными выбросами и сбросами; оценки уровней и характер загрязнения растительного покрова искусственными радионуклидами ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^3H .

Kazakhstan scientists jointly with the international scientific community have identified all significant plots of radioactive contamination, the main pathways and mechanisms of current and potential distribution of radioactive substances, including: health physics impacts of atmospheric nuclear tests; radioactive contamination of the former STS test area; problems of ever-increasing tritium amount that escape to the environment with radioactive releases and discharges; estimates of the levels and character of the plant cover contamination by man-made radionuclides of ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am , $^{239+240}\text{Pu}$ and ^3H .

Составитель - к.б.н. Т.И. Шилович

УДК 574:577.346
ББК 28.081:28.077

ISBN 978-5-903386-45-1

© ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2016

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ПРЕДИСЛОВИЕ	5
<i>Алексахин Р.М.</i> <i>академик РАН, вице-президент Международного союза</i> <i>радиоэкологии</i>	
ДОКЛАДЫ	
<i>Лукашенко С.Н., Умаров М.А., Айдарханов А.О., Мошков А.С.</i>	
СЕМИПАЛАТИНСКИЙ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ПОЛИГОН. ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ	11
<i>Мешков Н.А.</i>	
РАДИАЦИОННО-ГИГИЕНИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ АТМОСФЕРНЫХ ЯДЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ НА СЕМИПАЛАТИНСКОМ ПОЛИГОНЕ	26
<i>Умаров М.А., Лукашенко С.Н., Мошков А.С., Дмитропавленко В.Н., Новиков А.А., Батырбеков Э.Г., Березин С.А., Осинцев А.Ю.</i>	
РАДИОАКТИВНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ БЫВШЕЙ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ ПЛОЩАДКИ «ОПЫТНОЕ ПОЛЕ»	41
<i>Ляхова О.Н., Лукашенко С.Н., Тимонова Л.В., Сержанова З.Б., Раимканова А.М., Ларионова Н.В.</i>	
ТРИТИЙ В ВОЗДУХЕ: ИСТОЧНИКИ И МЕХАНИЗМЫ ОБРАЗОВАНИЯ	52
<i>Ларионова Н.В., Лукашенко С.Н.</i>	
ИСКУССТВЕННЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ В РАСТИТЕЛЬНОМ ПОКРОВЕ НА ТЕРРИТОРИИ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА	67
ЗНАМЕНАТЕЛЬНЫЕ ДАТЫ	
<i>Шубина О.А., Панов А.В.</i>	
О МОЛОДЕЖНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ «ВЗГЛЯД МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ НА СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ РАДИОБИОЛОГИИ, РАДИОЭКОЛОГИИ И РАДИАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ», ПОСВЯЩЁННОЙ 45- ЛЕТИЮ ОБРАЗОВАНИЯ ФГБНУ ВНИИРАЭ	93

CONTENTS

PREFACE	5
<i>Alexakhin R.M., RAS academician, vice-president of the International Union of Radioecology</i>	
REPORTS	
<i>Lukashenko S.N., Umarov M.A., Aidarkhanov A.O., Moshkov A.S.</i> SEMIPALATINSK TEST SITE. REGULARITIES AND PERSPECTIVES	11
<i>Meshkov N.A.</i> HEALTH-PHYSICS ESTIMATION OF IMPACTS OF ATMOSPHERIC NUCLEAR TESTS AT THE SEMIPALATINSK TEST SITE	26
<i>Umarov M.A., Lukashenko S.N., Moshkov A.S., Dmitropavlenko V.N., Novikov A.A., Batyrbekov E.G., Berezin S.A., Osintsev A.Yu.</i> RADIOACTIVE CONTAMINATION OF THE FORMER STS TEST AREA “OPYTNOE POLE”	41
<i>Lyakhova O.N., Lukashenko S.N., Timonova L.V., Serzhanova Z.B., Raimkanova A.M., Larionova N.V.</i> TRITIUM IN THE AIR: SOURCES AND MECHANISMS OF FORMATION	52
<i>Larionova N.V., Lukashenko S.N.</i> ARTIFICIAL RADIONUCLIDES IN THE PLANT COVER AT THE STS TERRITORY	67
MEMORABLE DATES	
<i>Shubina O.A., Panov A.V.</i> ON THE INTERNATIONAL CONFERENCE DEDICATED TO THE 45th RIRAE ANNIVERSARY: “TOPICAL ISSUES OF RADIOBIOLOGY, RADIOECOLOGY AND RADIATION TECHNOLOGIES FROM THE POINT OF VIEW OF YOUNG SCIENTISTS”	93

ПРЕДИСЛОВИЕ

Для развития радиоэкологии особое значение имеют исследования окружающей среды в регионах, характеризующихся повышенным содержанием радионуклидов (как природных, так и антропогенных). В этих условиях появляется возможность изучения закономерностей миграции радионуклидов по трофическим цепочкам при широком варьировании большого числа факторов (почвенные условия, метеорологические особенности, свойства ландшафтов и т.п.). Эти натурные работы в области радиоэкологии существенно расширяют возможности, ограниченные условиями лабораторных и микрополевых экспериментов. На территории с повышенной концентрацией радионуклидов, если они достигают достаточно высоких уровней, становится возможным изучение радиационных эффектов у биоты. Таким образом, дополняются сведения о действии ионизирующих излучений на растения и животных на экосистемном уровне, которые собираются в лабораторных радиобиологических опытах.

На прошлых XLIV Радиоэкологических чтениях В.М. Клечковского, состоявшихся 2 декабря 2015 г., предметом анализа состояния окружающей среды стала одна из горячих точек на виртуальной радиоэкологической карте нашей страны – Теченский каскад водоемов (ТКВ). На настоящих XLV чтениях предметом внимания становится ещё одна горячая точка – Семипалатинский испытательный полигон (СИП). На этой территории с 1949 г. за 40 лет (до 1989 г., когда СИП был официально закрыт) была выполнена обширная программа ядерных взрывов, цели которых различались в широких пределах (ядерное оружие, имитация мирных ядерных взрывов – подземных, камуфлетных и разрывом полости, апробация боевых ядерных и неядерных материалов, научные цели – гидродинамические опыты и т.д.). Нелишне напомнить, что на СИП было проведено испытание первой советской ядерной бомбы (1949 г.).

В результате проведения комплекса указанных ядерных взрывов сформировалась значительная территория с повышенным содержанием радионуклидов. По существу, это система отдельных площадей (многие из них достаточно большие), отличающихся по количеству содержащихся на них

запасов радионуклидов. С момента создания СИП фактически до настоящего времени на его территории выполнялись и продолжают производиться разноплановые комплексные радиоэкологические исследования по изучению транспорта радионуклидов в различных природных средах – атмосфере, гидросфере, почвенно-растительном покрове с охватом большого количества представителей биоты. Важно подчеркнуть, что эти работы проводятся на высоком методическом уровне с использованием прецизионной современной аппаратуры. К настоящему времени многие результаты радиоэкологических работ получили широкое международное освещение.

Своеобразие СИП относительно, скажем, региона аварии на Чернобыльской АЭС (1986 г.) и Кыштымской аварии с образованием Восточно-Уральского радиоактивного следа после аварии на ПО «Маяк» (1957 г.), где радионуклидный состав загрязнения (следов) был достаточно ограничен, связано с широким спектром радионуклидов, поступивших в окружающую среду (продукты деления, наведенные радионуклиды, делящиеся материалы). Многие из этих радионуклидов относятся к числу наиболее экологически опасных, с одной стороны, и относительно слабо изученных в радиоэкологии (в первую очередь, это надо отнести к ^3H , радионуклидам Pu , трансурановым радионуклидам), с другой стороны. Нахождение многих радионуклидов на площадках СИП при широком варьировании природных условий в достаточно высоких количествах создало уникальные возможности для радиоэкологических работ.

Целесообразно подчеркнуть, что в настоящее время в Казахстане на государственном уровне принято решение о реабилитации территории СИП и возвращении этих угодий в хозяйственное пользование. В этом контексте сбор и анализ радиоэкологической информации по СИП имеют первостепенное значение.

На XLV Радиоэкологических чтениях В.М. Ключковского заслушивается серия докладов по ряду аспектов радиоэкологии полигона, представленных прежде всего специалистами Национального ядерного центра Республики Казахстан. Лукашенко С.Н. дает общее описание полигона как уникального радиоэкологического полигона в плане его истории в целом.

Умаров М.А. описывает одну из наиболее загрязненных площадок в системе СИП. Ляхова О.Н. представляет радиоэкологию трития (прежде всего в воздухе), одного из наиболее важного в составе радионуклидов, находящихся в природной среде СИП. Описание поведения серии искусственных радионуклидов в системе почва – растение с учетом формы их нахождения в природной среде дается в докладе Ларионовой Н.В. Наконец, доклад Мешкова Н.А. затрагивает вопросы радиационной гигиены и эпидемиологии, связанные с радиоактивными выпадениями после ядерных взрывов на СИП. В настоящее время в Казахстане создается Национальный радиологический регистр жителей, попавших под воздействие радиоактивных выпадений, связанных с ядерными испытаниями на СИП (в него входит около 300 000 жителей региона), задачей которого является оценка медицинских последствий.

Можно выразить надежду, что проведение XLV Радиоэкологических чтений В.М. Ключковского, организуемых Федеральным агентством научных организаций, Российской академией наук, Всероссийским НИИ радиологии и агроэкологии, Научным советом РАН по радиобиологии, Общественным советом Госкорпорации «Росатом», Международным союзом радиоэкологии и Национальным ядерным центром Республики Казахстан ещё раз подтверждает, что эта площадка является хорошей формой творческих контактов радиоэкологов.

Обсуждение материалов по радиоэкологическим проблемам СИП, насыщенных богатыми радиоэкологическими и радиационно-гигиеническими экспериментальными данными, внесет свой вклад в развитие радиоэкологии, с одной стороны, и будет способствовать укреплению информационной базы для проведения реабилитационных работ в этом регионе, с другой стороны.

Академик РАН Р.М. Алексахин

PREFACE

For the development of radioecology of special importance are investigations of the environment in regions with the elevated contents of radionuclides (both natural and man-made). These situations provide a chance to study the regularities of radionuclide migration via the trophic chains with a large variation in the number of factors (soil conditions, meteorological conditions, landscape characteristics, etc.). These full-scale works in the field of radiology markedly increase the opportunities confined by laboratory and microfield experiments. In areas with increased radionuclide concentrations, should these reach rather high levels, it is feasible to study radiation effects on biota. Hence, the results can substantially enlarge the database on the ionizing radiation effects on plants and animals at the ecosystem level collected in the laboratory radiobiological experiments.

In the previous XLIV Radioecological Klechkovsky Readings held on December 2, 2015, a matter of the analysis of the environmental state was one of the hot points at a virtual radioecological map of this country – Techa cascade of water bodies. The focus of the current XLV Readings is another hot point – Semipalatinsk Test Site (STS). Over 40 years since 1949 (till 1989, when STS was officially closed) a comprehensive program of nuclear explosions has been implemented widely varying in the aims (nuclear weapons, imitation of peaceful nuclear denotations – underground, confined and those that disturb the surface, testing of military nuclear and non-nuclear materials, scientific purposes – hydrodynamic experiments, etc.). For information, STS saw the first Soviet atom test in 1949.

Because of all these nuclear experiments, there appeared a territory with the elevated radionuclide content. In fact, this is a set of separate areas (many of these are rather large) varying in the amounts of radionuclides. Since its foundation till the present day, STS is the site where different comprehensive radioecological investigations were and are now performed to study the radionuclide transport in various natural environments – atmosphere, hydrosphere, soil-plant cover involving large numbers of biota representatives. It is important to stress that all these investigations are organized at a high methodological level and use modern precision equipment. To date, a good many of these radioecological findings have received wide international media coverage.

A distinctive feature of STS relatively to, let's say, the Chernobyl affected region (1986) and Kyshtym event with the formation of the East-Urals radioactive trail after the accident at the "Mayak" PP (1957) where the radionuclide composition of contamination (traces) was rather limited, is a wide spectrum of radionuclides escaped to the environment (fission products, induced radionuclides, fissionable materials). Many of these are among the most ecologically dangerous radionuclides, on the one hand, and are relatively poor studied in radioecology, on the other hand (these are primarily ^3H , Pu radionuclides, transuranium radionuclides). The presence of many of radionuclides at STS plots with the natural conditions varying widely has created a unique opportunity for radioecological works.

It is worth noting that currently in Kazakhstan a decision is adopted at a state level on the rehabilitation of the territory and return of these lands to the economic use. In this context, collection and analysis of radioecological information about STS is of paramount importance.

In the agenda of the XLV Radioecological Klechkovsky Readings a series of reports are presented concerning different aspects of the test site radioecology. These are presented, first of all, by specialists of the National Nuclear Center of Kazakhstan Republic. Lukashenko S.N. describes STS as a unique radioecological test site in its historical aspect. Umarov M.A. dwells on the one of the most contaminated sites in the STS system. Lyakhova O.N. presents radioecology of tritium (primarily in the air), one of the most essential element in the STS radionuclide composition. A description of the behavior of some artificial radionuclides in the soil-plant system considering their speciation in the natural environment is a focus of the report of Larionova N.V. Finally, the report of Meshkov N.A. deals with the issues of health physics and epidemiology related to radioactive fallout after the nuclear detonations at STS. Currently, in Kazakhstan a National radiological register is being composed of residents affected by radioactive fallout of the STS origin (it includes some 300 000 residents), aimed at medical impact evaluating.

It is our hope that the XLV Radioecological Klechkovsky Readings organized by the Federal Agency for Scientific Organizations, Russian Academy of Sciences, Russian Institute of Radiology and Agroecology, RAS Scientific Council on radiobiology, International Union of Radioecology, Social Council of Goscorporation "Rosatom" and National Nuclear Center of

Kazakhstan proves once again that this forum is a good form of constructive contacts among radioecologists.

Discussion of materials on STS radioecological problems that contain rich radioecological and health physics experimental data will greatly contribute to the development of radioecology, on the one hand, and will help to strengthen the basis for the remediation measures in the region.

RAS Academician

R.M. Alexakhin

СЕМИПАЛАТИНСКИЙ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ПОЛИГОН. ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Лукашенко С.Н., Умаров М.А., Айдарханов А.О., Мошков А.С.

*Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии»
Республиканского Государственного предприятия
«Национальный ядерный центр» Республики Казахстан
г. Курчатов, Казахстан*

Семипалатинский испытательный полигон (СИП) представляет собой слабозаселенную холмисто-равнинную местность площадью 18300 км², расположенную в трех областях Республики Казахстан – Восточно-Казахстанской, Павлодарской и Карагандинской. На этой обширной территории полигона на разном расстоянии друг от друга находятся зоны ядерных испытаний – испытательные площадки «Опытное поле», «4», «4А», «Сары-Узень», «Балапан», «Дегелен», «Телькем» и «Актан-Берли» (рис. 1).

История Семипалатинского испытательного полигона началась с события мирового масштаба – испытания 29 августа 1949 г. первой советской атомной бомбы на площадке «Опытное поле» и закончилась 29 августа 1991 г. решением Президента Республики Казахстан о закрытии полигона.

Историческая справка об испытаниях и радиационной ситуации вблизи полигона

Опытное поле. Площадка «Опытное поле» представляет собой равнину диаметром 20 км, окруженную с трех сторон невысокими горами с площадью 300 км². Расположена севернее относительно центра полигона. На площадке (рис. 1), в период с 1949 по 1962 гг. было проведено 30 наземных и 86 воздушных ядерных испытаний. На ее территории располагался крупномасштабный комплекс инженерно-технических сооружений, предназначенных для регистрации всех параметров ядерных взрывов и изучения их развития во времени. Помимо этого, на территории площадки «Опытное поле» было проведено 40 гидроядерных и 5 гидродинамических экспериментов,

которые сопровождались диспергированием значительных количеств ядерных материалов в окружающую среду.

4 и 4А. Площадки «4» и «4А» (рис. 1) расположены восточнее и севернее относительно площадки «Опытное поле» на удалении около 20 км друг от друга. На них в период с 1953 по 1957 гг. были реализованы программы по испытанию боевых радиоактивных веществ (БРВ). Они представляли собой жидкие или порошкообразные радиоактивные рецептуры, изготовленные из отходов радиохимического производства. Рассеяние БРВ осуществлялось путем подрыва отдельных снарядов, бомбардировки участков минометными снарядами, сброса бомб с бомбардировщиков или распыления БРВ с самолетов. Существуют данные, что множество единиц военной техники, оборудования и самолетов, используемых в испытаниях, характеризовались значительными уровнями загрязнения и были захоронены в непосредственной близости к местам испытаний.

Балапан и Сары-Узень. Площадки «Балапан» и «Сары-Узень» (рис. 1) расположены у западной и у восточной границы относительно центра полигона. На них проводились подземные ядерные взрывы в вертикальных скважинах глубиной до 500 м. Всего на этих площадках проведено 129 ядерных испытаний, как правило, большой мощности – до 150 кт. На поверхности сооружался комплекс регистрации параметров эксперимента, а по глубине скважины – забивочный комплекс.

Атомное озеро (река «Шаган») расположены на юго-востоке площадки «Балапан». Озеро образовалась в месте слияния рек «Шаган» и «Ащису» в результате экскавационного взрыва в скважине №1004 ядерного устройства мощностью 140 кт 15.01.65 г. Он был произведен с целью образования искусственного водоема «Атомное озеро» и показал, что вред, наносимый промышленными ядерными технологиями, несоизмеримо больше их экономической выгоды. Размеры воронки составили 400 м в диаметре 100 м в глубину. Воронка заполнилась паводковыми водами весной того же года. Озеро соединено каналом с рекой Шаган, которая течет в северо-восточном направлении, выходит за пределы полигона и впадает в реку Иртыш.

Дегелен. Площадка «Дегелен» (рис. 1) расположена в 40 км южнее относительно геометрического центра полигона. На ней

проводились подземные испытания малой и средней мощности в штольнях (тоннелях). Площадка расположена в одноименном горном массиве, который представляет собой куполовидное поднятие размером в диаметре 17-18 км. Общая площадь составляет около 300 км². Штольня имеет вид горизонтальной горной выработки длиной от нескольких сотен метров до 2 километров с диаметром ствола выработки около 3 м. Всего в период с 1961 по 1989 гг. было проведено 209 ядерных испытаний в 181 штольне.

Телькем. Площадка «Телькем» (рис. 1) расположена на северо-востоке полигона в 15 км от его границы. На площадке было проведено два подземных ядерных испытания с выбросом грунта: одиночное испытание «Телькем-1» (21.10.1968 г.) и групповой ядерный взрыв из трех линейно расположенных зарядов «Телькем-2» (12.11.1968 г.), в результате чего образовалась воронка вытянутой формы. В данных экспериментах осваивалась технология сооружения водных каналов, которые можно было бы использовать для отвода воды из арктических районов страны в бассейн реки Волга и в Каспийское море.

Актан-Берли. Площадка «Актан-Берли» расположена в 10 км западнее относительно площадки «Дегелен». На площадке «Актан-Берли» (рис. 1) проводились неядерно-взрывные эксперименты (гидроядерные и гидродинамические испытания), в которых использовались делящиеся материалы, но ядерной энергии практически не выделялось. Данных по этой площадке крайне мало, но известно, что эксперименты сопровождалось диспергированием значительных количеств ядерных материалов.

Объекты без названий. Помимо этого, за период деятельности СИП, на его территории было заложено несколько площадок для испытаний с применением обедненного урана, а также могильников, в которых захоранивали высокотоксичные и высокорadioактивные отходы. Официальных данных о таких участках найдено не было.

Реакторные комплексы. В 1961 г. на территории полигона был введен в эксплуатацию импульсный графитовый реактор (ИГР) на тепловых нейтронах. В 1962-1970 гг. был создан реакторный комплекс «Байкал-1» (рис. 1), где проводились испытания тепловыделяющих сборок ядерных ракетных двигателей и ядерных энергодвигательных установок в реакторе.

Карта территории Семипалатинского испытательного полигона

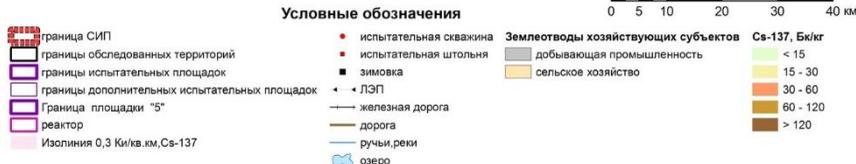
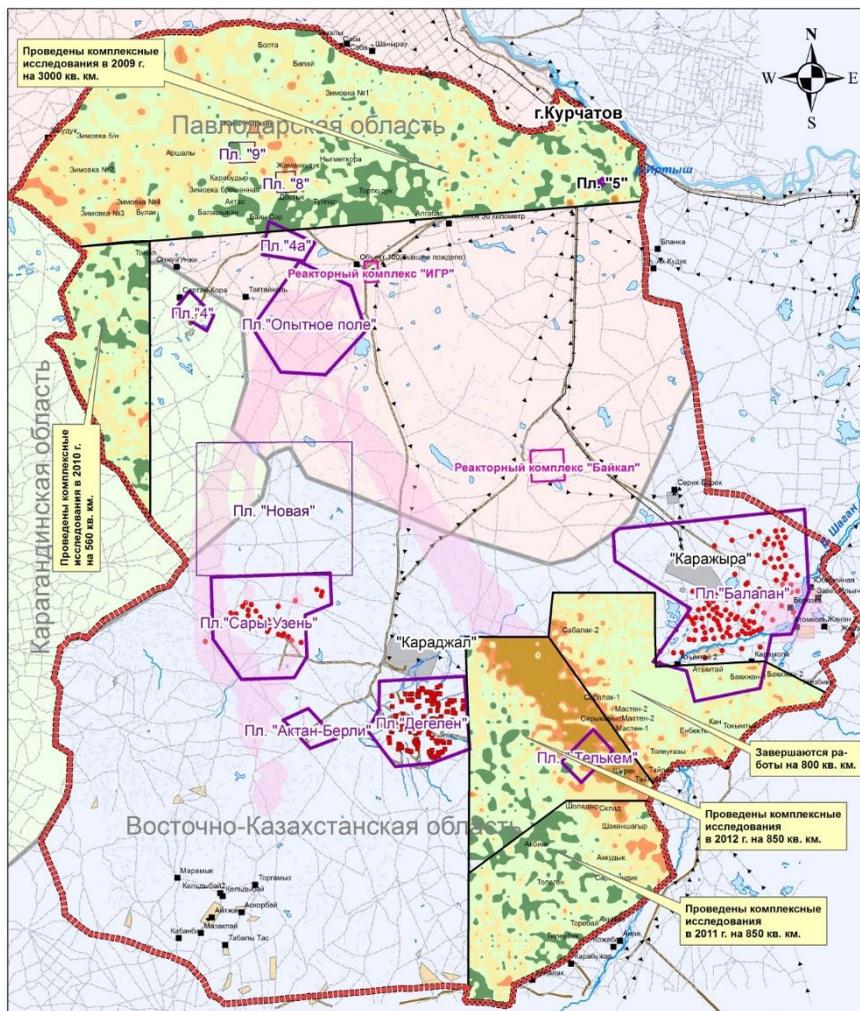


Рисунок 1 – Общая карта Семипалатинского испытательного полигона

В период проведения экспериментальных пусков в атмосферу неоднократно выбрасывались радиоактивные аэрозоли.

История полигона с момента его закрытия

Распад СССР и указ о закрытии полигона заставили в корне перестроить все планы военных. Полигон был расформирован в декабре 1993 г. согласно директиве министра обороны Российской Федерации. Молодая Республика Казахстан оказалась не в состоянии контролировать столь огромные территории с точки зрения обеспечения радиационной безопасности и ограничения доступа к опасным объектам вследствие тяжелой экономической ситуации. Военные в спешке покинули территорию, на которой десятилетиями создавалась мощная испытательная инфраструктура. В 1995 г. зарядом обычной взрывчатки было уничтожено последнее ядерное устройство, приготовленное к испытанию еще до закрытия полигона.

На территории испытательных площадок оказались брошенными различные инженерные комплексы, технологическое оборудование и коммуникационные комплексы, открытые штольни, скважины, груды металлолома, использованные кабели, рельсы, крепи, разрушенная боевая техника и т.д. В условиях бесконтрольности и тяжелой экономической ситуации на территории полигона развернулась крупномасштабная незаконная деятельность среди местного населения по извлечению и вывозу с территории полигона вышеперечисленных элементов с целью дальнейшей продажи в качестве металлолома. Многие из людей, занимающихся данной деятельностью, жили непосредственно в местах проведения этих работ, пили воду, выходящую из штолен, получая, предположительно, значительные дозы радиации. Получение этих доз могло сформировать вторую волну повышенного облучения людей, контроль и учет которых, по понятным причинам, не производился.

Современное радиэкологическое состояние полигона

Опытное поле. Наибольший вклад в загрязнение полигона и прилегающих к нему территорий оказали наземные ядерные испытания, в результате проведения которых грунт,

выброшенный из воронки, попадал в светящуюся область (огненный шар), где происходило его смешение с продуктами ядерного взрыва. В результате этого процесса происходило образование масштабных радиоактивных следов в направлении движения воздушных потоков.

В настоящее время загрязнение площадки «Опытное поле» не является равномерным, а приурочено непосредственно к местам проведения наземных ядерных взрывов, размеры которых незначительны и не превышают первых сотен метров. Наиболее мощные взрывы привели к загрязнению полигона и территории за ее пределами.

Исследовательские работы позволили выявить множество эпицентров ядерных испытаний (включая места аварийных экспериментов), эпицентров неядерно-взрывных испытаний, одно захоронение ядерных материалов и несколько локальных очагов радиоактивного загрязнения. Характерные размеры участков радиоактивного загрязнения в эпицентральных зонах варьируют от 10 до 1000 м, ширина следов – от десятков до тысяч метров, длина – от сотен до десятков тысяч метров. Удельная активность радионуклидов достигает следующих величин: ^{137}Cs - $n\text{Ч}10^5$ Бк/кг, ^{90}Sr - $n\text{Ч}10^6$ Бк/кг и $^{239+240}\text{Pu}$ - $n\text{Ч}10^7$ Бк/кг.

Радиационная ситуация во времени достаточно стабильна, но частые степные пожары способствуют некоторому перераспределению радионуклидов в пространстве, так как растительность, произрастающая в эпицентральных зонах и в местах выпадения следов, может содержать определенные количества техногенных радионуклидов, перешедших в них. Стоит отметить, что значительные площади территории площадки можно отнести к «условно чистым», где зафиксированы концентрации техногенных радионуклидов сравнимы с уровнями глобальных выпадений.

4 и 4А. На площадках «4» и «4А» обнаружено более 30 участков локального радиоактивного загрязнения. Основным загрязнителем является ^{90}Sr . Характерные размеры участков радиоактивного загрязнения в эпицентральных зонах варьируют от нескольких десятков до нескольких сотен метров. Удельная активность ^{90}Sr достигает $n\text{Ч}10^7$ Бк/кг.

Радиационная ситуация на данных площадках нестабильна и постепенно меняется во времени. ^{90}Sr , находящийся на

территории участков, легко переходит в растения и далее в животных, питающихся ими. Например, в теле ящерицы, пойманной на одном из участков БРВ, было обнаружено 100000 Бк/кг ^{90}Sr , что может быть приравнено к радиоактивным отходам. Особенностью данного радионуклида является то, что его накопление в организме является непрерывным при его постоянном поступлении. Также существует опасность ежегодных степных пожаров, способствующих дальнейшей миграции радионуклида, перешедшего в растения, на значительные расстояния.

Балапан и Сары-Узень. Подземные испытания на площадках «Балапан» и «Сары-Узень» не оказали такого негативного влияния на формирование радиационной обстановки на дневной поверхности, потому что основная доля радиоактивных продуктов остается «захороненной» в геологической толще пород. Максимальные концентрации радионуклидов на таких участках находятся у оголовков скважин, а размеры не превышают единиц метров. Удельная активность радионуклидов достигает следующих величин: ^{137}Cs - $n\text{Ч}10^4$ Бк/кг, ^{90}Sr - $n\text{Ч}10^3$ Бк/кг и $^{239+240}\text{Pu}$ - $n\text{Ч}10^4$ Бк/кг.

Исключение составляли взрывы неполного камуфлета в скважинах площадки «Балапан» №№1007, 1069, 1204, 1301 и площадки «Сары-Узень» №№101, 111 и 215, когда при испытаниях возникали нештатные радиационные ситуации, связанные с выбросом радиоактивности в окружающую среду. Характерные размеры участков радиоактивного загрязнения в зонах выбросов этих скважин варьируют от десятков до сотен метров, а удельная активность радионуклидов достигает следующих величин: ^{137}Cs - $n\text{Ч}10^6$ Бк/кг, ^{90}Sr - $n\text{Ч}10^5$ Бк/кг и $^{239+240}\text{Pu}$ - $n\text{Ч}10^5$ Бк/кг. Экскавационные взрывы, проведенные на площадке «Сары-Узень» в скважинах №№1003 и 125, вызвали значительное радиоактивное загрязнение местности, распространяющегося на сотни метров, а след от испытания в скважине №101 прослеживается на расстоянии нескольких километров.

В целом радиозэкологическая ситуация на площадках «Балапан» и «Сары-Узень» стабильна, процессов миграции радионуклидов не наблюдается, кроме ситуации на реке Шаган.

Атомное озеро (река Шаган). Во время проведения испытания основная часть радионуклидов осела

непосредственно в месте проведения испытания. Удельная активность радионуклидов достигает следующих величин: ^{137}Cs - $n\text{Ч}10^4$ Бк/кг, ^{90}Sr - $n\text{Ч}10^4$ Бк/кг, $^{239+240}\text{Pu}$ - $n\text{Ч}10^4$ Бк/кг, ^{152}Eu - $n\text{Ч}10^4$ Бк/кг. В точке выхода реки Шаган из Атомного озера исследования показали, что концентрации радионуклидов в воде не превышают предельно допустимых концентраций (ПДК, см. в табл. 1) для населения. Но на отрезке, расположенном на расстоянии от 4 до 6 км от Атомного озера, были обнаружены крайне высокие концентрации ^3H , до $1\text{Ч}10^6$ Бк/л (табл.1). Концентрации остальных радионуклидов при этом не превышают ПДК. Тритиевое загрязнение, не связано с Атомным озером и обусловлено поступлением тритиевых вод из района боевых скважин площадки «Балапан». Данный процесс нестабилен во времени и меняется в зависимости от времени года и гидрогеологического режима. Площадь высоких концентраций ^3H , превышающих уровень ПДК имеет протяженность около 35 км и выходит за пределы площадки «Балапан» и самого полигона. Данный факт является существенной проблемой, так как в пойме реки Шаган активно развивается животноводство.

Дегелен. Достаточно сложная ситуация на площадке «Дегелен», где часть штолен являются водоносными. Через разуплотненную породу, находящуюся над эпицентральной зоной, ежегодно проникают талые воды, стремящиеся к точке подземного взрыва – месту экстремальных концентраций техногенных радионуклидов. В результате происходит процесс вымывания радиоактивных частиц через тело штольни и дальнейшая миграция в долины ручьев. Результатом этого процесса является появление новых и увеличение старых «пятен» радиоактивного загрязнения. Проведение ремедиационных мероприятий на таких участках экономически нецелесообразно, так как первоочередным мероприятием должны стать работы по герметизации порталов штолен. Наиболее загрязненными участками являются припортальные участки штолен с водотоками. Удельная активность радионуклидов штольневых водах достигает следующих величин: ^{137}Cs - $n\text{Ч}10^3$ Бк/кг, ^{90}Sr - $n\text{Ч}10^3$ Бк/кг, $^{239+240}\text{Pu}$ - $n\text{Ч}10^2$ Бк/кг и ^3H - $n\text{Ч}10^6$ Бк/л. Учитывая крайне высокие концентрации всех радионуклидов в штольневых водах, можно сказать, что их употребление в питьевых целях недопустимо.

Помимо водоносных штолен, существует проблема загрязнения вследствие многократного использования штолен во времена испытаний. В ряде случаев, с целью повторного использования объекта, загрязненный забивочный комплекс штольни демонтировался и вывозился на дневную поверхность. В результате этих мероприятий, произошло загрязнение припортовой территории большими объемами радиоактивных отходов. Характерные размеры участков радиоактивного загрязнения варьируют от десятков до сотен метров. Удельная активность радионуклидов в почвах припортовых площадок водоносных штолен достигает следующих величин: ^{137}Cs - $n\text{Ч}10^6$ Бк/кг, ^{90}Sr - $n\text{Ч}10^7$ Бк/кг и $^{239+240}\text{Pu}$ - $n\text{Ч}10^8$ Бк/кг (см. в табл. 1). Уровни загрязнения возле «сухих» штолен, как правило, на один-два порядка ниже, либо загрязнение отсутствует вовсе.

Радиоэкологическая ситуация на площадке нестабильна и развивается во времени. Возможна не только вертикальная и горизонтальная миграция техногенных радионуклидов, но переход их в растения и животных.

Телькем. На площадке «Телькем» обнаружены два локальных участка радиоактивного загрязнения, обусловленного выбросом большого количества загрязненного грунта. Характерные размеры участков радиоактивного загрязнения в эпицентральных зонах не превышают 200 м. Следов радиоактивных выпадений не обнаружено. Удельная активность радионуклидов на гребнях воронок достигает следующих величин: ^{137}Cs - $n\text{Ч}10^4$ Бк/кг, ^{90}Sr - $n\text{Ч}10^3$ Бк/кг и $^{239+240}\text{Pu}$ - $n\text{Ч}10^5$ Бк/кг. Радиоэкологическая ситуация стабильна во времени.

Актан-Берли. На площадке Актан-Берли были обнаружены участки экстремальных концентраций диспергированных делящихся материалов. Характерные размеры участков радиоактивного загрязнения в эпицентральных зонах не превышают нескольких десятков метров. Удельная активность радионуклидов достигает следующих величин: ^{137}Cs - $n\text{Ч}10^2$ Бк/кг, ^{90}Sr - $n\text{Ч}10^2$ Бк/кг и $^{239+240}\text{Pu}$ - $n\text{Ч}10^8$ Бк/кг. Радиоэкологическая ситуация стабильна во времени.

Объекты без названий. На территории трех обнаруженных могильников найдены приповерхностные захоронения радиационно-загрязненной химической посуды, ветоши, инструментов, защитных комплектов, спецодежды, а также высокорadioактивных ампульных источников ионизирующего

излучения, мощность эквивалентной дозы вблизи которых достигает единиц мЗв/ч. На участках с фрагментами обедненного урана содержание ^{238}U достигает $n\text{Ч}10^5$ Бк/кг. Поперечные размеры объектов не превышают 200 м. Радиоэкологическая ситуация стабильна во времени, но существует риск несанкционированной деятельности на данных территориях.

Следы радиоактивных выпадений. Радиоактивное загрязнение за пределами территорий испытательных площадок сформировалось в результате выпадений продуктов ядерных взрывов из радиоактивных облаков, которые перемещались по направлению движения воздушных потоков от мест проведения испытаний. Первое представление о радиационной обстановке на СИП было получено в результате выполненной аэрогамма-спектрометрической съемки, которая показала, что максимальное загрязнение ^{137}Cs сосредоточено не только на территории площадки «Опытное поле», но и в масштабных следах радиоактивных выпадений юго-восточного и юго-западного направлений. Их длина достигает 90 и >100 км соответственно, а ширина - 15 км. Концентрации техногенных радионуклидов по мере удаления от эпицентров испытаний спадают по экспоненциальному закону. Удельная активность радионуклидов достигает следующих величин: ^{137}Cs - $n\text{Ч}10^3$ Бк/кг, ^{90}Sr - $n\text{Ч}10^3$ Бк/кг и $^{239+240}\text{Pu}$ - $n\text{Ч}10^3$ Бк/кг.

Реакторные комплексы. Помимо ядерных испытаний, существенным источником загрязнения СИП были реакторные комплексы «ИГР» и «Байкал-1», 28 «горячих» пусков которых были связаны с выносом радиоактивности в атмосферу. Детальной информации о радиоэкологическом состоянии прилегающей к ним территории нет.

Условно чистые территории. Одним из важнейших результатов работ стало понимание того, что часть территории СИП является "чистой" и не представляет никакой опасности для населения, так как концентрации техногенных радионуклидов, распределенных на их территории, не превышают уровней глобальных выпадений (см. табл. 1). Такая территория могла бы использоваться в народном хозяйстве и приносить пользу.

Таблица 1 – Предельные концентрации и уровни глобальных выпадений основных техногенных радионуклидов

Параметр	^{137}Cs	^{90}Sr	$^{239+240}\text{Pu}$	H^3
МЗУА*, Бк/кг	10000	100000	1000	
Глобальные выпадения**, Бк/кг	10-20	10-20	0,5-2	
ПДК*** в воде, Бк/л	11	5	0,56	7700

* МЗУА - минимально-значимая удельная активность (уровень удельной активности радионуклида, при превышении концентрации которого содержащий его материал можно считать радиоактивными отходами).

** Глобальные выпадения – уровень загрязнения Северного полушария Земли техногенными радионуклидами, нарабатанными в результате проведения атмосферных ядерных испытаний, радиационных аварий и выбросов во всем мире.

***ПДК - предельно-допустимая концентрация (при превышении данного параметра вода, содержащая данный радионуклид, считается жидкими радиоактивными отходами).

Поэтому, с целью поэтапного вывода территории СИП из состава земель запаса и ввода их в народнохозяйственный оборот, уже несколько лет ведутся крупномасштабные исследования его территории, условно поделенной на приоритетные участки. В 2008-2013 гг. выполнены масштабные исследования на площади 6000 км² приоритетных «условно чистых» территорий СИП (33% территории полигона). Проведены исследования почвенного, растительного покрова, воздушного бассейна и водной среды, состояния флоры и фауны, сделаны прогнозные расчеты изменения радиационной ситуации. Для получения максимально достоверных данных проведены натурные эксперименты на базе организованного "фермерского" хозяйства.

Основным выводом данных работ является заключение о возможности неограниченного использования большей части исследованных территорий полигона, а остальная часть должна оставаться в составе земель запаса. Исследование других частей полигона продолжается по настоящее время, и уже сегодня можно уверенно сказать, что результатом этих работ должен

стать ввод до 80% земель СИП в народнохозяйственный оборот, а оставшиеся территории (испытательные площадки и зоны масштабных радиоактивных выпадений) должны находиться под жестким радиоэкологическим контролем. Существующие границы полигона совершенно не соответствуют реальной радиационной ситуации и являются явно избыточными и необоснованными.

Для того, чтобы сравнить существующие уровни загрязнений на различных испытательных площадках с установленными нормативами и уровнями глобальных выпадений, ниже представлена таблица (табл. 1).

Описание работ, проведенных по снижению радиоэкологической напряженности

С целью сохранения научного потенциала и конверсии военной инфраструктуры в мирную, на базе бывшего полигона 15 мая 1992 г. был создан Национальный Ядерный Центр Республики Казахстан (НЯЦ РК). Развернулись масштабные работы по исследованию последствий ядерных испытаний и решению вопросов уменьшения радиоэкологической напряженности в местах проведения ядерных испытаний.

Опытное поле. С целью ограничения доступа к эпицентральной зоне, проведены работы по созданию физических барьеров по контурам зон максимального радиоактивного загрязнения. Барьер представлял собой глубокий ров, который является естественным препятствием для проникновения техники и животных. На наиболее загрязненных участках в данный момент проводятся работы по ликвидации загрязнения методом снятия верхнего слоя грунта, замешиванию его в бетонно-магнетитовый раствор и захоронению полученных материалов в контролируемых условиях. На менее загрязненных участках проводится ремедиация методом глубокой вспашки с оборотом пласта на 180 градусов, результатом которой является значительное снижение концентраций техногенных радионуклидов в верхнем слое почвы.

Балапан и Сары-Узень. С целью ликвидации испытательной инфраструктуры и улучшения радиоэкологической ситуации на площадке "Балапан" проведен комплекс ликвидационных мероприятий, который заключался в уничтожении инженерных комплексов, размещенных над боевыми скважинами, путем

подрывов химическими зарядами. На обоих площадках проведены работы по демонтажу всех оголовков скважин.

Атомное озеро (река "Шаган"). Несмотря на сложную радиозоологическую ситуацию на реке "Шаган" и масштабную миграцию тритиевых вод за пределы полигона, ремедиационные работы на данном участке не проводились.

Дегелен. Ремедиационные мероприятия на площадке "Дегелен" заключались в консервации ядерно-испытательного штольневого комплекса путем заполнения полостей взрывов с отходами ядерной деятельности связующим раствором. В результате было исключено вымывание радиоактивных частиц родниковой и талой водой из порталов тоннелей. Со временем это могло бы привести к ухудшению радиационной обстановки как на испытательной площадке, так и на ее прилегающих территориях. Радиоактивные отходы, сконцентрированные на припортальных площадках, завозились при помощи погрузочно-доставочной машины в тело штольни, портал бетонировался и маскировался под окружающий ландшафт. Эти мероприятия способствовали существенному улучшению радиационной ситуации на припортальных участках. Всего за период ремедиационных работ на объектах площадки «Дегелен» было создано дополнительных бетонных защитных сооружений объемом около 90000 куб. метров.

Телькем. Ремедиационные работы по снижению радиозоологической напряженности на площадке "Телькем" не проводились вследствие экономической нецелесообразности таких работ на больших площадях.

Актан-Берли. Работы по ликвидации последствий гидроядерных экспериментов на площадке "Актан-Берли" заключались в сооружении специального защитного инженерного комплекса типа "саркофаг" над эпицентрными зонами. Бетонный саркофаг обеспечил надежную защиту загрязнений от возможной миграции радионуклидов, а земляная обваловка обеспечила маскировку под окружающий ландшафт.

Объекты без названий. На одном из могильников в 2010 г. проведены работы по извлечению радиоактивных материалов из под земляной отсыпки и захоронению их в контролируемых условиях. На данном участке значительно улучшена радиозоологическая ситуация.

Реакторные комплексы. Радиоэкологическая ситуация неизвестна как на территории реакторных комплексов, так и за их пределами. Ремедиационных мероприятий на их территории и вблизи них не проводилось.

Следы радиоактивных выпадений. Учитывая значительные площади следов радиоактивных выпадений, ремедиационных мероприятий на их территории не осуществлялось.

Влияние полигона на жизнь и здоровье людей

В целом, влияние СИП на жизнь и здоровье людей можно разделить на три основных этапа:

1) Облучение населения вследствие масштабных радиоактивных выпадений в период активных наземных и воздушных ядерных испытаний 1949-1962 гг.

2) Регулярное сейсмическое, а также психологическое воздействие на население в период подземных ядерных испытаний в период 1962-1989 гг.

3) Вторая «волна» возможных облучений вследствие незаконной деятельности по демонтажу, вскрытию и проникновению в котловые полости и эпицентральные зоны в период с 1989 по 2013 годы. Нельзя исключать и мощное психологическое воздействие на население, живущее на полигоне или вблизи него. Связано это, прежде всего, с близостью полигона, радиофобией и отсутствием необходимой информации у населения о реальной радиоэкологической обстановке.

Анализируя ситуацию на испытательных площадках и в местах радиоактивных выпадений, можно сказать, что существует множество зон, требующих ограничения пребывания на них сельскохозяйственных животных и населения. Это эпицентральные зоны изученных площадок, следы радиоактивных выпадений, либо аварийных выбросов, локальные участки загрязнения боевыми радиоактивными веществами, участок реки Шаган (как внутри, так и за пределами полигона) и площадка «Дегелен» в целом. Могильники, обнаруженные в процессе исследования полигона, также представляют угрозу для окружающей среды и человека. Их особенность состоит в том, что они могут содержать мощные источники ионизирующего излучения, которые представляют реальную угрозу для жизни человека в случае

несанкционированного доступа к ним. Всего обнаружено три таких объекта. Официальных данных об их наличии на полигоне нет. Поэтому не исключено, что их количество гораздо больше.

Описание будущего развития полигона

С момента закрытия полигона до настоящего времени «Институтом Радиационной Безопасности и Экологии» НЯЦ РК совместно с международным сообществом получен большой объем информации относительно текущей радиационной ситуации на СИП и прилегающих территориях. Выявлены все значимые участки радиоактивного загрязнения, основные пути и механизмы потенциального распространения радиоактивных веществ. Полученные данные позволяют сделать вывод, что в настоящее время СИП не оказывает негативного влияния на население, за исключением зоны влияния реки Шаган и случаев незаконного проникновения в эпицентральные зоны проведенных экспериментов. Вместе с тем, радиэкологическая ситуация не является стабильной, выявлены процессы миграции радиоактивных веществ, что вызывает необходимость проведения регулярного мониторинга радиационной ситуации на СИП. Безусловно, учитывая масштабность и многообразие испытаний на СИП, имеющаяся информация не является исчерпывающей, но позволяет предположить дальнейший план исследовательских работ и ремедиационных мероприятий. Результатом этого в будущем должен стать ввод до 80% земель СИП в народнохозяйственный оборот. Остальные территории, ремедиация которых экономически нецелесообразна, должны быть огорожены, обозначены предупреждающими знаками радиационной опасности, а на их территории должен проводиться регулярный радиэкологический контроль.

РАДИАЦИОННО-ГИГИЕНИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ АТМОСФЕРНЫХ ЯДЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ НА СЕМИПАЛАТИНСКОМ ПОЛИГОНЕ

Мешков Н.А.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Научно-исследовательский институт экологии человека и
гигиены окружающей среды им. А.Н. Сысина»
Министерства здравоохранения Российской Федерации,
Москва, Россия*

Введение

Радиоактивному загрязнению вследствие атмосферных ядерных испытаний на Семипалатинском полигоне (СП) подвергались территории Семипалатинской области, Республики Алтай (РА) и Алтайского края (АК) [1-4]. В результате многолетних радиоэкологических исследований на этих территориях получены данные о распределении ^{137}Cs в почве. Выявлена мозаичность пространственного распределения ^{137}Cs , максимальные плотности которого приурочены к вершинам хребтов и почвам окаймления котловин, а минимальные – в почвах днищ котловин и речных долин. ^{137}Cs сосредоточен в основном в верхнем 5 см слое почв и значительно меньше – на глубине более 15-20 см [5-9].

После завершения атмосферных ядерных испытаний на СП формирование доз облучения населения происходило за счет поступления в организм ^{137}Cs с продуктами питания местного производства, взвешенными частицами пыли, содержащимися во вдыхаемом воздухе, и с проглатываемой почвой [10-12].

Основными источниками поступления ^{137}Cs в организм человека являются продукты питания животного (молоко) и растительного (зерновые) происхождения. Содержание ^{137}Cs в литре коровьего молока составляло 08-1,1% от суточного поступления [13-15]. В Семипалатинской области в организм жителей, проживающих вблизи СП, с молоком поступало 77,0 Бк/год ^{137}Cs , с мясом – 75,1 Бк/год [16].

В связи с этим представляется актуальным изучение возможных радиационных последствий для здоровья населения в современных условиях на территориях, подвергавшихся

радиоактивному загрязнению в период атмосферных испытаний на СП.

Целью работы является радиационно-гигиеническая оценка последствий атмосферных испытаний ядерных устройств на Семипалатинском полигоне.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования является пищевая цепочка поступления ^{137}Cs в организм населения, проживающего на территориях, подвергавшихся радиоактивному загрязнению в период атмосферных ядерных испытаний на СП: почва – растения – хлеб, молоко и мясопродукты, и отдаленные последствия радиационного воздействия для здоровья.

Предмет исследования – удельная активность ^{137}Cs в почве и основных пищевых продуктах, составляющих рацион питания взрослого населения; подвергавшихся радиоактивному загрязнению в период атмосферных ядерных испытаний, и прогноз радиологических последствий радиационного воздействия на население Республики Алтай. Прогноз радиологических последствий выполнен в соответствии с Публикацией 103 МКРЗ [17].

Для анализа пространственного и внутрипрофильного распределения ^{137}Cs в почвах Республики Алтай использовались результаты радиоэкологических исследований, выполненных в рамках ФЦП по оказанию медицинской, социальной помощи населению и нормализации санитарно-гигиенического состояния населенных пунктов Республики Алтай, подвергшихся радиационному воздействию в результате ядерных испытаний на Семипалатинском полигоне [9, 12].

Содержание ^{137}Cs в пищевых продуктах изучали по данным радиационного контроля, выполнявшегося радиологической группой СЭС Алтайского края. Была проанализирована динамика удельной активности радиоактивного ^{137}Cs в хлебе, молоке, картофеле и мясе (говядина и баранина), произведенных и выращенных на территории Алтайского края и Горного Алтая в 1966-1985 гг. [10,12].

Результаты исследований

Исследование пространственного и внутрипрофильного распределения активности ^{137}Cs в почвах Республики Алтай

выявило неравномерность запасов этого радионуклида в почве в зависимости от ее генезиса (рис. 1).

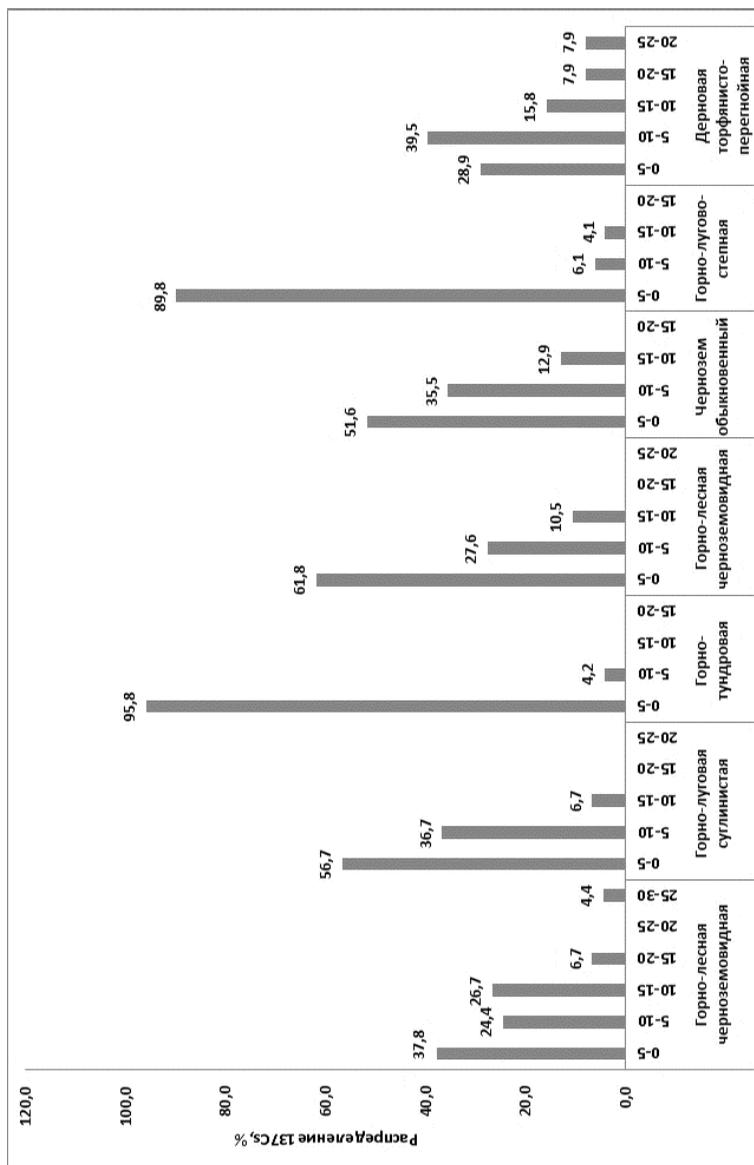


Рисунок 1 – Внутрипрофильное распределение ¹³⁷Cs в почвах Республики Алтай разного генезиса

Как видно на рис. 1, основные запасы ^{137}Cs сосредоточены в верхних (0-5 и 5-10 см) слоях гумусового горизонта и различаются по величине в зависимости от типа почвы: на 1-м месте горно-тундровая почва, на 2-м и 3-м местах – соответственно горно-луговая степная и горно-лесная черноземовидная.

Районы Республики Алтай существенно различаются по типам почв и, соответственно, по запасам ^{137}Cs и его распределению в профилях почв. Вертикальное распределение ^{137}Cs в почвах районов Республики Алтай представлено на рис. 2.

На рис. 2 показано, что в Онгудайском и Чемальском районах в слое почвы 0-10 см сосредоточено 100% запасов этого радионуклида, на 2-м и 3-м местах по этому показателю находятся Майминский и Кош-Агачский районы. В среднем по республике в слое 0-10 см сосредоточено 82,0 (73,7-90,4) % запасов ^{137}Cs , в слоях 10-20 см и 20-40 см – соответственно 19,6 (14,3-24,9) % и 12,4 (1,9-26,7) %.

Содержание ^{137}Cs в слоях почвы 0-10 см и 10-20 см в районах Республики Алтай представлено на рис. 3 и 4.

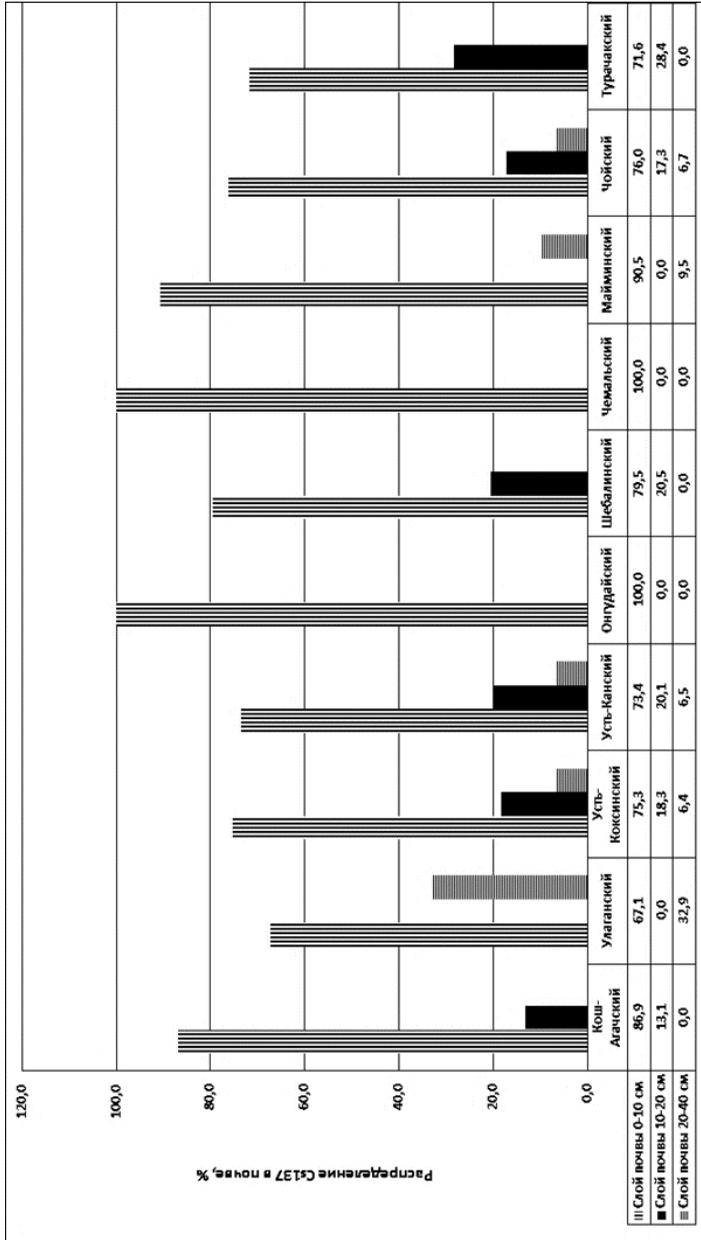


Рисунок 2 – Внутрипрофильное распределение ^{137}Cs в почвах районов Республики Алтай

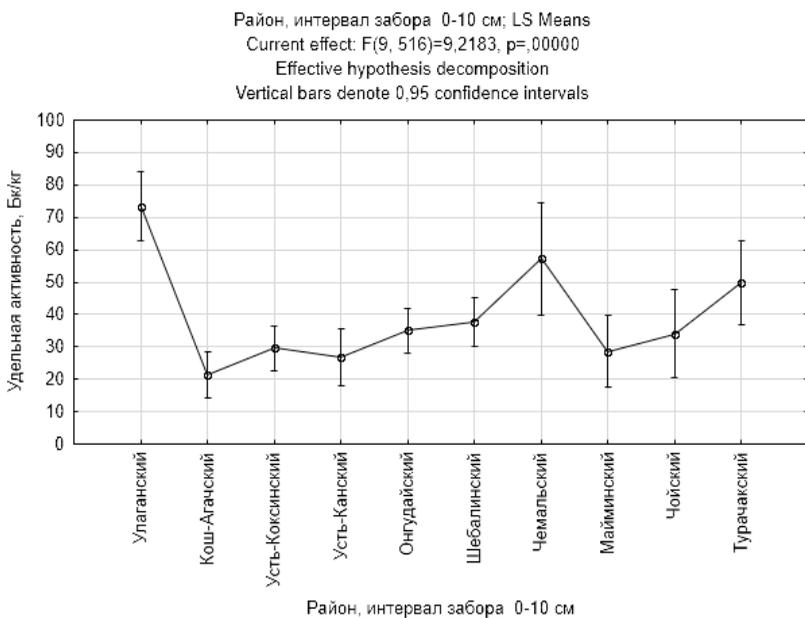


Рисунок 3 – Удельная активность ^{137}Cs в интервале 0-10 см

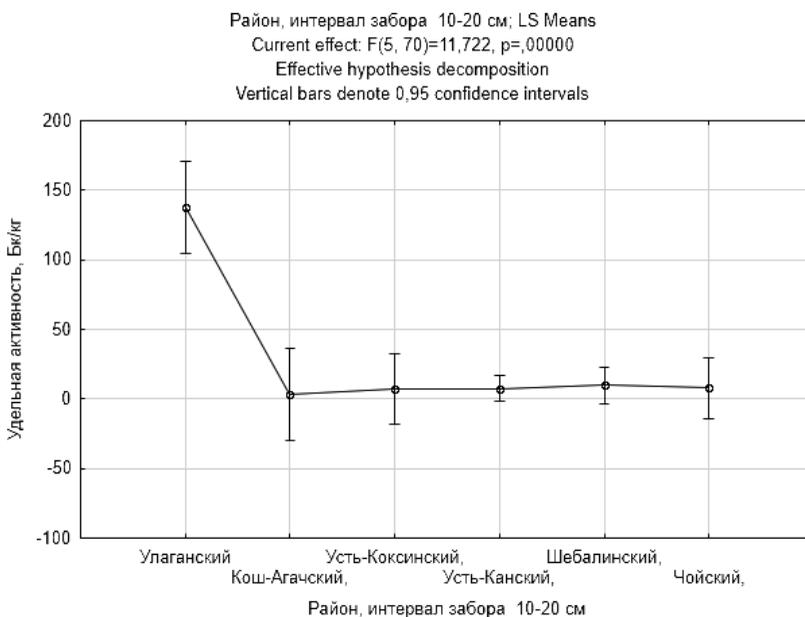


Рисунок 4 – Удельная активность ^{137}Cs в интервале 10-20 см

Как видно на рис. 3 и 4, наиболее высокая активность ^{137}Cs в слоях 0-10 см и 10-20 см аккумулирована в почве Улаганского района – соответственно 73,4 (50,9-96,0) и 36,0 (-26,3-98,3) Бк/кг. На 2-м месте по запасам ^{137}Cs в слое почвы 0-10 см находится Чемальский район 57,2 (43,8-70,7) Бк/кг, на 3-м – Турочакский 49,9 (35,9-63,8) Бк/кг. В слое почвы 10-20 см 2-е и 3-е место по запасам ^{137}Cs занимают соответственно Шебалинский 9,7 (6,6-12,8) Бк/кг и Чойский 7,7 (3,3-12,1) Бк/кг районы. Превышение уровня глобальных фоновых выпадений [6] в 1,6 раза ($p = 0,05$) выявлено только в Улаганском районе. Следует отметить, что локальные участки с превышением глобального фона, как правило, приурочены к горным вершинам. В целом запасы ^{137}Cs на территории Республики Алтай находятся на уровне глобальных выпадений и ниже.

Сравнение активности ^{137}Cs в почве Республики Алтай через 30 и 40 лет после атмосферных испытаний (АИ) и через 30 лет в Семипалатинской области (СО) представлено на рис. 5.

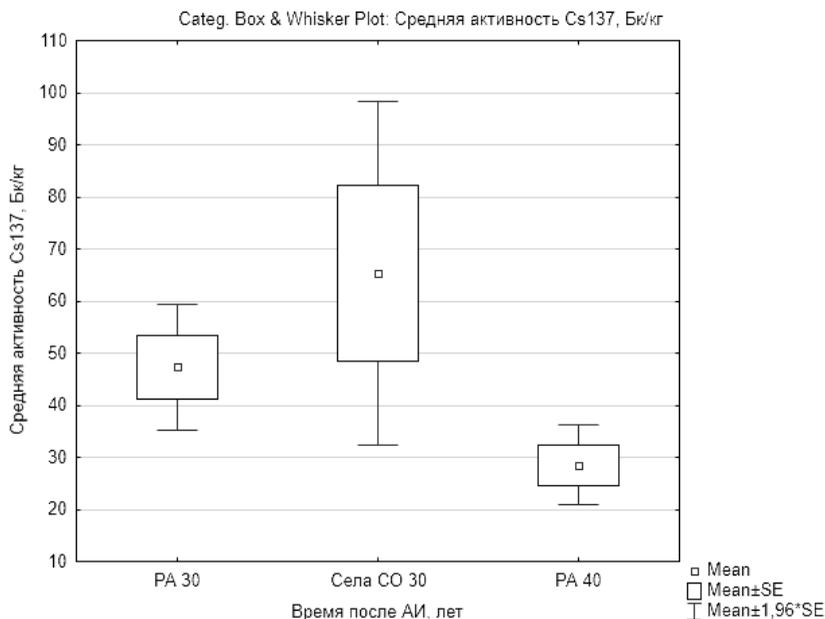


Рисунок 5 – Средняя активность ^{137}Cs в почвах Республики Алтай (РА) и Семипалатинской области (СО) через 30 и 40 лет после ядерных испытаний в атмосфере, Бк/кг

На рис. 5 показано, что средняя активность ^{137}Cs в почве Республики Алтай спустя 30 лет после завершения атмосферных испытаний ядерных устройств в 1,4 раза ниже, чем на территории Семипалатинской области ($p > 0,05$). Через 40 лет средняя активность ^{137}Cs в почве Республики Алтай снизилась в 1,7 раза (Mann-Whitney U Test – $p < 0,004$; Kolmogorov-Smirnov Test – $p < 0,025$).

Анализ динамики средней удельной активности ^{137}Cs в хлебе, мясе (говядина и баранина), молоке и картофеле в РА и АК проводился в период с 1966 г., через 3 года после прекращения ядерных испытаний в атмосфере, по 1985 г. (за 1 год до аварии на Чернобыльской АЭС). Для анализа динамики в этом временном ряду были выделены 3 периода: 1966-1975, 1976-1980 и 1981-1985 гг. В РА во 2-м периоде отсутствовали данные о содержании ^{137}Cs в картофеле, а в АК данные о содержании этого радионуклида в молоке за 1966-1985 гг. и в картофеле – в период с 1976 г. по 1985 г. Результаты анализа временных рядов средней удельной активности ^{137}Cs в этих пищевых продуктах представлены на рис. 6.

На рис. 6 показано, что содержание ^{137}Cs в пищевых продуктах в 1966-1985 гг. стабильно снижалось как в РА, так и в АК. Вместе с тем эта динамика по отдельным продуктам существенно различалась. Так, в 1976-1980 гг. в РА и АК наблюдался положительный темп прироста удельной активности ^{137}Cs в мясе – соответственно 14,9 и 8,4%, а в АК еще и в хлебе – 14,9%. В АК слабо выраженный темп прироста удельной активности ^{137}Cs в мясе наблюдался и в 1981-1985 гг. – 3,1%.

Содержание ^{137}Cs в молоке, мясе и картофеле в Республике Алтай в 1981-85 гг. сопоставимо с данными С.Н. Лукашенко по Семипалатинскому полигону [19].

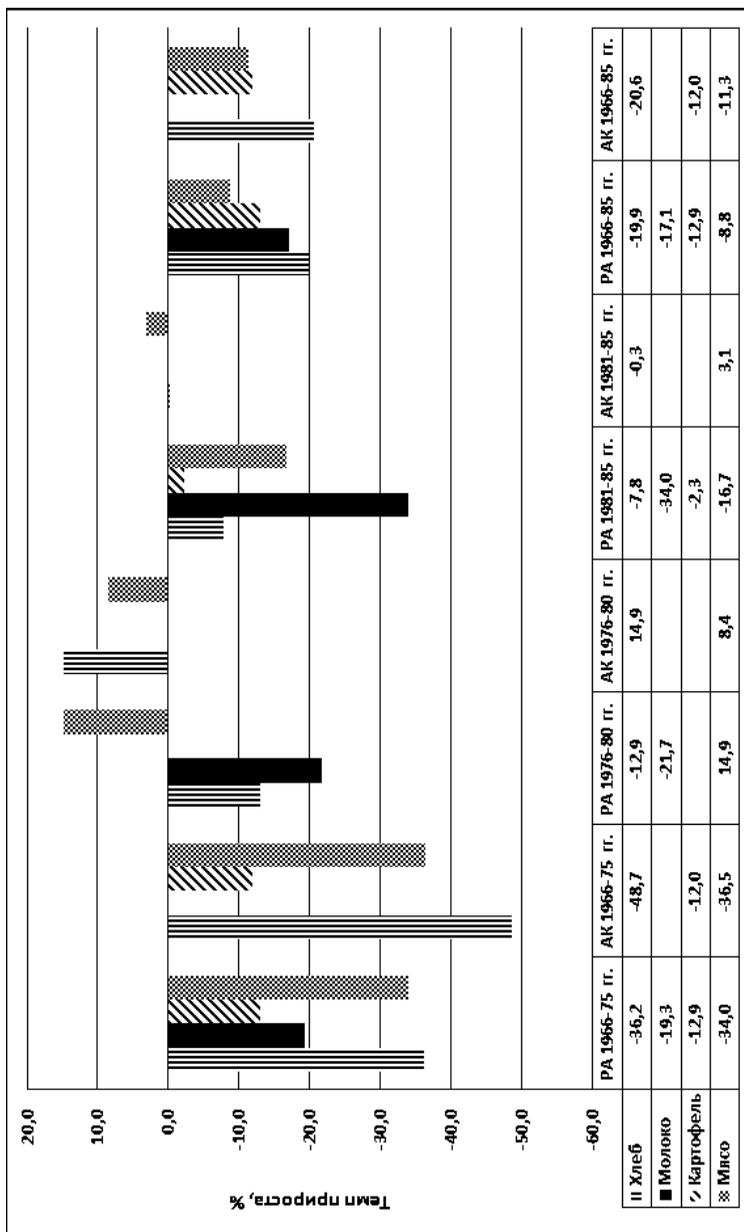


Рисунок 6 – Темпы прироста удельной активности ¹³⁷Cs в пищевых продуктах в Республике Алтай и в Алтайском крае в 1966-1985 гг., %

Для оценки радиационного воздействия на жителей территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению в период прохождения облаков ядерных взрывов, изучали поступление ^{137}Cs с основными пищевыми продуктами и суммарное поступление с рационом питания в организм взрослого населения РА и АК. В связи с отсутствием данных о содержании ^{137}Cs в молоке для АК содержание этого радионуклида в молоке в РА сравнивались с данными по РСФСР для зоны 1 и зоны 2. Результаты сравнения представлены на рис.7.

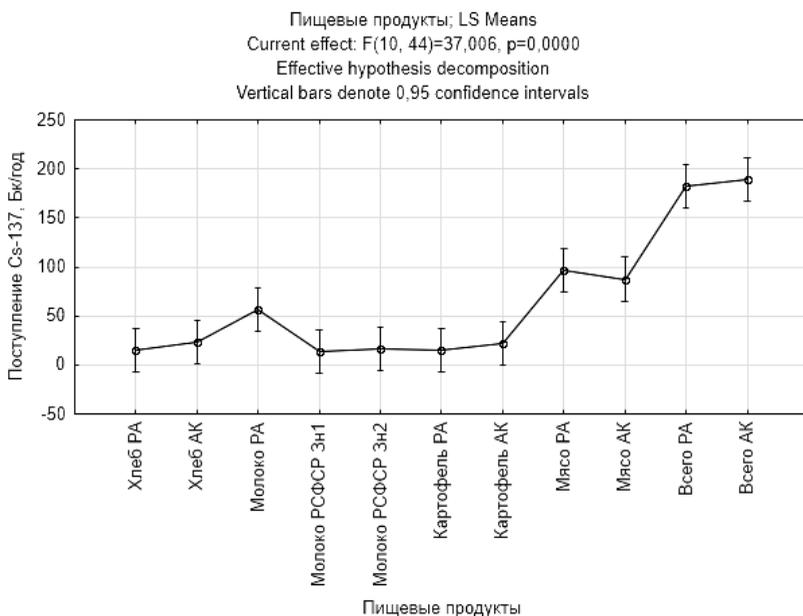


Рисунок 7 – Среднегодовое поступление ^{137}Cs в организм взрослого населения Республики Алтай и Алтайского края с основными пищевыми продуктами, Бк/год

На рис.7 показано, что как в РА, так и в АК наибольшее количество ^{137}Cs поступает в организм взрослого населения с мясом. В РА среднегодовое поступление ^{137}Cs с мясом выше, чем с хлебом (Mann-Whitney U Test – $p < 0,04$) и картофелем (Mann-Whitney U Test – $p < 0,05$), различие с молоком не достигает статистической значимости ($p < 0,12$). Аналогичная ситуация имеет место и в АК – соответственно $p < 0,01$ (Mann-Whitney U Test) и $p < 0,01$ (Mann-Whitney U Test). Содержание

^{137}Cs в молоке РА значительно выше, чем в зонах 1 и 2 РСФСР – соответственно $p < 0,01$ (Mann-Whitney U Test) и $p < 0,01$ (Mann-Whitney U Test).

Сравнение уровней годового поступления ^{137}Cs с основными продуктами питания с пределом годового поступления (ПГП) для критических групп населения в 80-х годах НРБ-76/87 [17] показало, что реализовавшееся годовое поступление в организм взрослого населения Республики Алтай и Алтайского края составляет для ^{137}Cs соответственно 0,04% и 0,03% ПГП, а при сравнении с ПГП в НРБ-99/2009 [18] – соответственно 0,24% и 0,25% ПГП, то есть значительно ниже допустимого уровня.

Средние индивидуальные годовые эффективные дозы облучения взрослого населения Республики Алтай за счет продуктов местного производства (хлеб, молочные продукты, картофель и мясо) представлены в табл.1.

Таблица 1 – Индивидуальные годовые эффективные дозы облучения взрослого населения Республики Алтай за счет поступления ^{137}Cs в организм с основными продуктами питания (хлеб, молоко, мясо, картофель), мЗв/год

Территории	Доза, мЗв/год в период (95%СІ)	
	1981-1985 гг.	2010 г. [19]
Республика Алтай	0,124 (0,079-0,272)	0,017 (0,011-0,037)

Как видно из табл.1, индивидуальные годовые эффективные дозы облучения взрослого населения РА, АК и РФ в 2010 г. на порядок меньше, чем в 1981-1985 гг.

При прогнозе отдаленных последствий принималось, что суммарный риск от смертельного рака, наследственных эффектов и несмертельного рака для одного человека при облучении в дозе 1 Зв принимается равным 0,057 [20]. Риск оценивался по произведению индивидуального риска на коллективную дозу, рассчитанную для населения [12], подвергшегося радиационному воздействию в период атмосферных ядерных испытаний, по дозам внутреннего облучения вследствие поступления ^{137}Cs в организм взрослого населения с основными продуктами питания в 1981-1985 гг. (I-й период) и в 2010 г. (II-й период).

Прогноз отдаленных последствий внутреннего облучения взрослого населения Республики Алтай при поступлении ^{137}Cs с основными продуктами питания представлен в табл. 2.

Таблица 2 - Прогноз отдаленных последствий облучения населения Республики Алтай в результате ядерных испытаний на Семипалатинском полигоне вследствие поступления ^{137}Cs в организм взрослого населения с основными продуктами питания

Территории	Отдаленные последствия					
	Смертельные раки		Наследственная патология		Всего	
	Периоды					
	I	II	I	II	I	II
г. Горно-Алтайск	23	3	0,6	0,8	24	3
Майминский	9	1	0,2	0,3	9	1
Шебалинский	5	1	0,1	0,2	5	1
Онгудайский	4	1	0,1	0,1	5	1
Усть-Канский	6	1	0,2	0,2	7	1
Усть-Коксинский	4	1	0,1	0,1	4	1
Улаганский	4	0,5	0,1	0,1	4	1
Кош-Агачский	3	0,4	0,1	0,1	3	0,4
Турочакский	3	0,4	0,1	0,1	3	0,4
Чойский	1	0,1	0,03	0,04	1	0,2
Всего в РА	63	9	1,5	2	64	9

Из табл. 2 видно, что к 2010 г. прогнозируемые отдаленные последствия внутреннего облучения за счет поступления в организм взрослого населения Республики Алтай ^{137}Cs , содержащегося в основных пищевых продуктах, снизились в 7 раз.

Вклад внутреннего облучения в формирование отдаленных последствий в Республике Алтай за счет поступления в организм ^{137}Cs с основными продуктами питания в 1981-1985 гг. составлял 6,1%, в 2010 г. – 0,9%.

Выводы

1. Пространственное и внутрипрофильное распределение запасов ^{137}Cs в почве характеризуется мозаичностью и неравномерностью в зависимости от ее генезиса. Локальные участки, превышающие глобальный фон, приурочены к горным вершинам. Максимальная удельная активность ^{137}Cs свойственна для горно-тундровых почв Горного Алтая и сконцентрирована в основном в поверхностных (0-10 см) горизонтах почв, его доля в этом почвенном профиле в среднем по Республике Алтай составляет 82,0%, в слоях 10-20 см и 20-40 см – соответственно 19,6% и 12,4%.

2. Выраженное снижение удельной активности ^{137}Cs в продуктах питания в Республике Алтай и в Алтайском крае наблюдалось в 1966-1975 гг. – в хлебе соответственно -36,2% и -48,7%, в мясе -34,0% и -36,5%. В 1976-1980 гг. отмечен положительный темп прироста удельной активности ^{137}Cs в мясе (14,9 и 8,4%) и в хлебе в Алтайском крае (14,9%). Незначительный темп прироста удельной активности ^{137}Cs в мясе (3,1%) в Алтайском крае продолжался и в 1981-1985 гг.

3. В Республике Алтай и в Алтайском крае в организм взрослого населения наибольшее количество ^{137}Cs поступает с мясом ($p < 0,04$ и $p < 0,01$). Содержание ^{137}Cs в молоке РА выше, чем в зонах 1 и 2 РСФСР соответственно в 4,3 и 3,5 раза ($p < 0,01$). Реализовавшееся годовое поступление ^{137}Cs с продуктами питания в организм взрослого населения Республики Алтай и Алтайского края в 1981-1985 гг. составляло соответственно 0,04% ПГП, а в 2010 г. – 0,24% и 0,25% ПГП.

4. Индивидуальные годовые эффективные дозы внутреннего облучения взрослого населения Республики Алтай и Алтайского края за счет поступления ^{137}Cs с продуктами питания в 1981-1985 гг. (0,124 и 0,115 мЗв/год) на порядок превышали дозы в 2010 г. (0,017 и 0,027 мЗв/год).

5. Вероятность отдаленных последствий внутреннего облучения за счет поступления в организм взрослого населения Республики Алтай ^{137}Cs в 1981-1985 гг. в 7 раз превышала аналогичные прогнозные величины в 2010 г. Вклад внутреннего облучения в формирование отдаленных последствий в 1981-1985 гг. и в 2010 г. составлял соответственно 6,1% и 0,9%.

Список литературы

1. Цыб А.Ф., Степаненко В.Ф., Питкевич В.А., Мешков Н.А. и др. Вокруг Семипалатинского полигона: радиэкологическая обстановка, дозы облучения населения в Семипалатинской области (по материалам отчета межведомственной комиссии) // Медицинская радиология. – 1989. – № 12.
2. Мешков Н.А., Жилиев Е.Г., Вальцева Е.А., Галин Л.Л. Экологические и медико-биологические последствия воздействия ядерных испытаний на территорию и население Республики Алтай / Центр экстремальной медицины Гостехкомиссии России при Президенте Российской Федерации, ГВМУ МО РФ; Под ред. А.Ф. Цыба, И.М. Чижва – М.: Воентехиниздат, 1999. – 144 с.
3. Медико-социальные последствия ядерных испытаний / Мешков Н.А., Вальцева Е.А., Аветисов Г.М., Иванов В.К., Казаков С.В. – М.: Воентехиниздат, 2003. – 398 с.
4. Гордеев К.И., Балуев О.Т., Даренская Н.Г., Логачев В.А., Мешков Н.А. и др. Концепция реабилитации населения и нормализации экологической, санитарно-гигиенической, медико-биологической и социально-экономической ситуации в населенных пунктах Алтайского края, расположенных в зоне влияния ядерных испытаний на Семипалатинском полигоне // Вестник научной программы "Семипалатинский полигон-Алтай". – 1995. – № 3. – С. 11-15.
5. Кайзер М.И., Алейникова В.Н. Внутрипрофильное распределение цезия-137 в почвах Горного Алтая. URL: <http://e-lib.gasu.ru/konf/biodiversity/2005/29.pdf>
6. Алейникова В.Н., Кузнецова М.И. Содержание цезия 137 в почвах Горного Алтая / Аналитика Сибири и Дальнего Востока – 2004: Сб. матер. VII конференции, 10-16 октября 2004, г. Новосибирск. – С. 427.
7. Балыкин С.Н., Пузанов А.В. Радионуклиды в горно-лесных дерново-подзолистых почвах Горного Алтая // Ползуновский вестник. – 2006. – № 2. – С. 305-309.
8. Егорова И.А., Кислицина Ю.В., Пузанов А.В. Радионуклиды в почвах северо-западного Алтая // География и природные ресурсы. – 2012. – № 3. – С. 31–35.
9. Мешков Н.А., Пузанов А.В. Характер пространственного и внутрипрофильного распределения ^{137}Cs на территории Горного Алтая / Радиоактивность после ядерных взрывов и аварий: последствия и пути преодоления: Матер. научн.-практич. конф., 19-21 апреля 2016 г., г. Обнинск Калужской области.
10. Мешков Н.А., Вальцева Е.А. Содержание радиоцезия в основных пищевых продуктах в районе населения Республики Алтай // Ползуновский вестник. – 2009. – № 4. – С. 227-233.
11. Мешков Н.А. Радиационно-гигиеническая оценка доз облучения населения Республики Алтай при различных путях поступления ^{137}Cs в

организм / Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы IV Международной конференции, 4–8 июня 2013 г., г. Томск. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 620 (365-367) с.

12. Радиоэкологические и медико-биологические последствия радиационного воздействия / Н.А. Мешков [и др.]; Науч.-исслед. ин-т экологии человека и гигиены окружающей среды им. А. Н. Сысина, Рос. мед. акад. последиплом. образования, Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т вод. и экол. проблем. – СПб.: Наука, 2012. – 234 с.

13. Василенко И.Я. // Вопросы питания. – 1988. – №4. – С. 4-11.

14. Василенко И.Я. // Природа. – 1999. – №3.

15. Василенко И.Я., Василенко О.И. Радиоактивный цезий // Энергия: экономика, техника, экология. – 2001. – №7. – С.16-22.

16. Ибадильдин А.С., Малгаждаров М.С., Амантаева К.К. Показатели удельной активности радионуклидов, поступающих с продуктами животного происхождения в организм людей, проживающих в Семипалатинском регионе / Клиническая медицина (Новгород). – 2005. – №11. – С. 6-8.

17. Нормы радиационной безопасности (НРБ-76/87).

18. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009).

19. Лукашенко С.Н. Радиоэкологическое обоснование возвращения территорий Семипалатинского испытательного полигона в хозяйственное использование: фундаментальные и прикладные аспекты: Автореф. ... дисс. докт. биол. наук. – Обнинск, 2016. – 47 с.

20. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2010 году: Информационный сборник. – Санкт-Петербург, НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2012. – 68 с.

21. ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission of Radiological Protection. ICRP Publication 103, Ann. ICRP.

РАДИОАКТИВНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ БЫВШЕЙ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ ПЛОЩАДКИ «ОПЫТНОЕ ПОЛЕ»

Умаров М.А.¹, Лукашенко С.Н.¹, Мошков А.С.¹,
Дмитропавленко В.Н.¹, Новиков А.А.¹, Батырбеков Э.Г.²,
Березин С.А.², Осинцев А.Ю.²

¹ Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии»
Республиканского Государственного предприятия «Национальный
ядерный центр» Республики Казахстан

² Республиканское Государственное предприятие Национальный
ядерный центр Республики Казахстан
Курчатов, Казахстан

Введение

Основной площадкой для проведения наземных испытаний на Семипалатинском полигоне являлась площадка «Опытное поле», где было проведено 86 воздушных и 30 наземных ядерных испытаний [1]. Площадка представляет собой открытую равнинную местность площадью ~300 км.². Очевидно, что такое количество ядерных испытаний на сравнительно небольшой территории должно было сформировать масштабное радиоактивное загрязнение почвенного покрова. Это подтверждается результатами многочисленных исследований, проведенных на площадке «Опытное поле» в период с 1991 по 2012 гг.

Наиболее важными в понимании характера пространственного распределения радионуклидов на площадке стали исследования 2010-2011 гг., которые заключались в отборе и лабораторном анализе проб почвы, отобранных по регулярной сети 500x500 м (более 1000 проб). Тем не менее, данное исследование вскрыло несколько проблемных моментов, касающихся интерпретации некоторых результатов. Так, были обнаружены участки, радиоактивное загрязнение которых, сформировано преимущественно америцием и плутонием, при практически полном отсутствии продуктов деления (цезий, стронций); в некоторых случаях выявлялось аномально высокое изотопное соотношение Pu/Am (40-50), в то время, как в подавляющем количестве случаев это соотношение лежит в диапазоне 5-15. Но самое главное это то, что применяемый метод обследования (анализ образцов почвы, отобранных по

регулярной сети) не позволил идентифицировать эпицентры большинства, проведенных на ней ядерных испытаний.

Для получения полной картины пространственного распределения техногенных радионуклидов в поверхностном слое почвы необходимо было существенно сгущать сеть обследования. Однако, данный подход экономически не эффективен и потребовал бы, помимо огромных финансовых вложений, значительных временных затрат, связанных с анализом сотен тысяч проб.

В этой связи, для детального обследования площадки был разработан и впервые применен метод пешеходной гамма-спектрометрической съемки, который позволил определять активность в поверхностном слое почвы таких радионуклидов, как ^{241}Am , ^{137}Cs и ^{152}Eu .

Данные элементы, собственно, перекрывают весь основной диапазон типов продуктов, образующихся при ядерном взрыве – продукты деления, продукты активации и материал ядерного заряда. Это позволяет оценить активность других техногенных радионуклидов, образованных в результате испытаний, но анализ которых сопряжен с сложностью его выполнения, используя изотопные отношения. Для каждого испытания изотопные отношения продуктов деления, продуктов активации и материала ядерного заряда будут стабильными, с известной долей вероятности. Естественно, что для разных ядерных испытаний такое соотношение также будет разным.

Так, по активности ^{137}Cs можно оценивать активность ^{90}Sr (тоже продукт деления ядерного взрыва); по активности ^{241}Am – $^{239+240}\text{Pu}$ (оба являются элементами материала ядерного заряда); по активности ^{152}Eu – ^3H (продукты активации).

Экспериментальная часть

Принцип исследования площадного радиоактивного загрязнения площадки «Опытное поле» заключался в наборе массива данных - гамма-спектров, во время движения оператора с гамма-спектрометром по заданному маршруту. Для этого, предварительно, вся площадка и прилегающая к ней территория (1 км от границы площадки) была разбита на элементарные секторы размером 500x500 м. На каждый сектор была наложена сеть профилей, с расстоянием между ними - 20 м, т.е.

рассчитаны координаты начала и конца профилей. Далее, оператор осуществлял движение по заданным профилям.

Для проведения пешеходной гамма-спектрометрической съемки применялось следующее оборудование:

а) Полевой гамма-спектрометр со сцинтилляционным детектором на основе кристаллов бромида лантана ($\text{LaBr}_3(\text{Ce})$).

б) Анализатор импульсов ORTEC DigiBase.

с) Ноутбук или подобный PC для управления системой набора гамма-спектров.

д) Wi-Fi-адаптер с внешней антенной «TP-LINK» для передачи данных в пункт управления работой оператора.

е) Система навигации - GPS Garmin Oregon 550 – для движения «оператора» строго вдоль профиля.

ф) Программное обеспечение:

- «Spectrool» (ИРБЭ) – программа пакетной обработки гамма-спектров;
- SpectroolsFisher (ИРБЭ) – программа записи спектров и их синхронизации с координатами в месте набора спектров.

Время набора каждого гамма-спектра составляло 10 с.

Высота расположения детектора над поверхностью – 0,5 м.

Скорость движения оператора – 2-3 км/ч.

Применение выбранного оборудования и заданных параметров его использования позволило детектировать радионуклиды в почве в единицах удельной активности - ^{137}Cs на уровне ~150 Бк/кг; ^{241}Am - ~450 Бк/кг, ^{152}Eu - ~300 Бк/кг.

Результаты и обсуждение

Обследование всей площадки «Опытное поле», а также прилегающей территории (1 км от границы площадки), было проведено за три года – 2012-2014 гг. Общая площадь обследования составила 350 км².

По результатам пешеходной гамма-спектрометрической съемки построены карты-схемы распределения ^{241}Am , ^{137}Cs и ^{152}Eu (сps) на обследованной территории (рисунки 1-3).

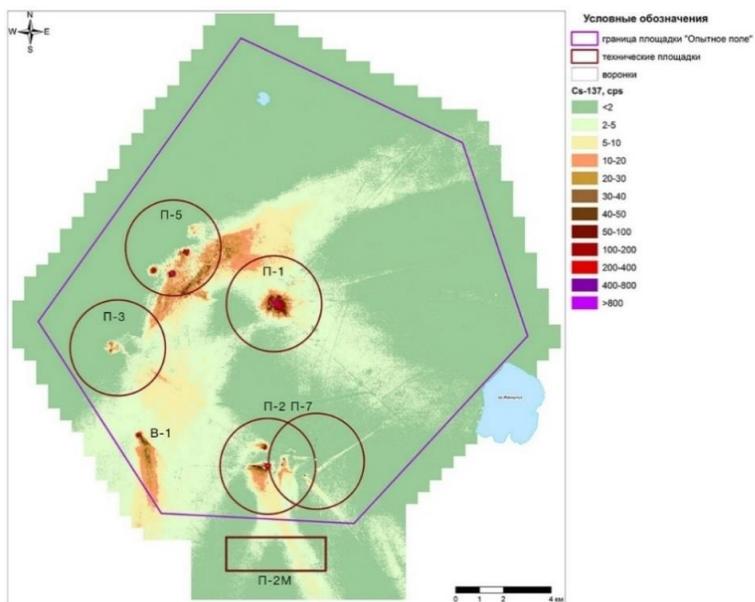


Рисунок 1 – Площадное распределение ^{137}Cs на территории площадки «Опытное поле»

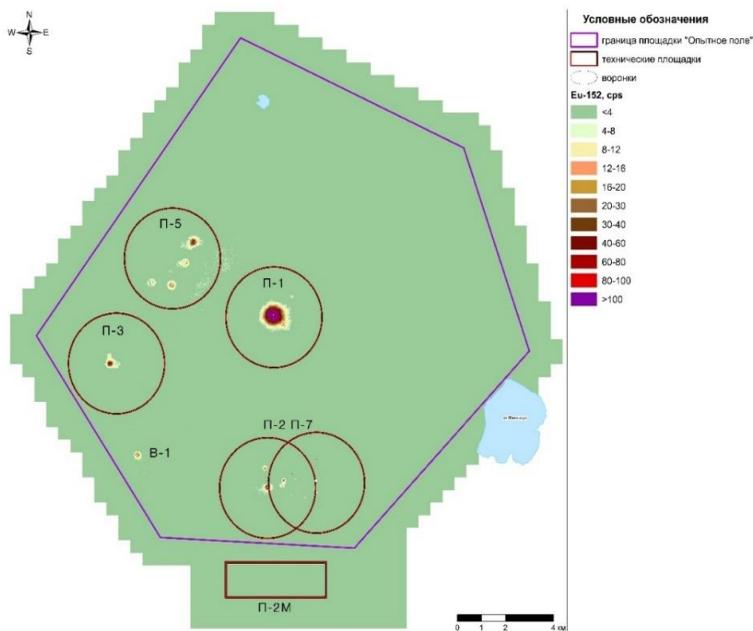


Рисунок 2 – Площадное распределение ^{152}Eu на территории площадки «Опытное поле»

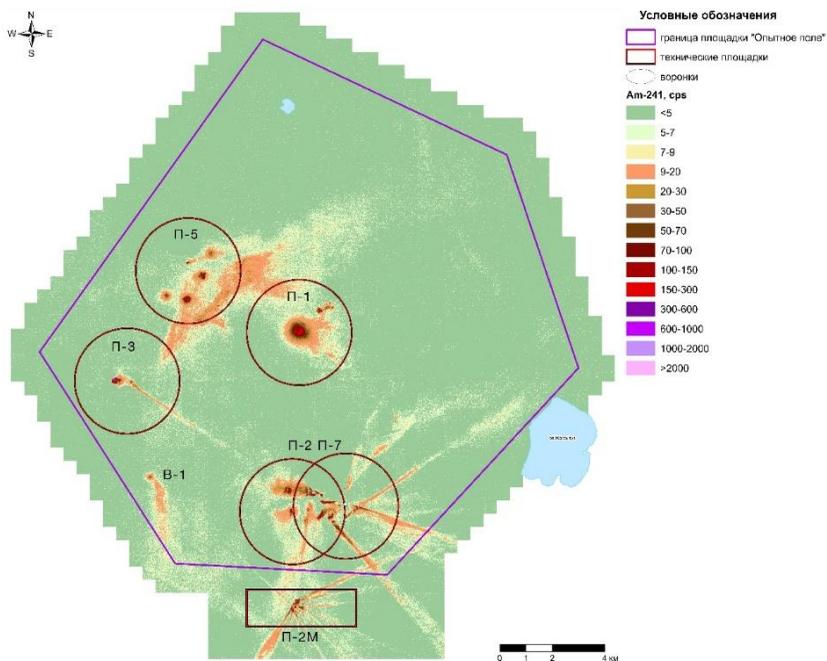


Рисунок 3 – Площадное распределение ^{241}Am на территории площадки «Опытное поле»

Как видно из представленных карт (рисунки 1-3), площадное распределение исследуемых техногенных радионуклидов несколько различается между собой. Эти различия показывают, что привычный взгляд на радиоактивное загрязнение площадки «Опытное поле», как результат только ядерных испытаний, не является полным. Радиоактивное загрязнение площадки сформировано как ядерными испытаниями, так и различными экспериментами с ядерными материалами (плутоний и уран), которые не сопровождались цепной реакцией, и как следствие, не приводили к образованию изотопов, образующихся в результате деления ядра заряда и нейтронной активации объектов окружающей среды.

«Классическому» представлению о радиационной обстановке на площадке «Опытное поле» соответствует карта площадного распределения ^{137}Cs (рис. 1). На ней можно выделить несколько областей радиоактивного загрязнения,

приуроченные к техническим площадкам П-1, П-3, П-5, П-2, П-7 (рис. 4).

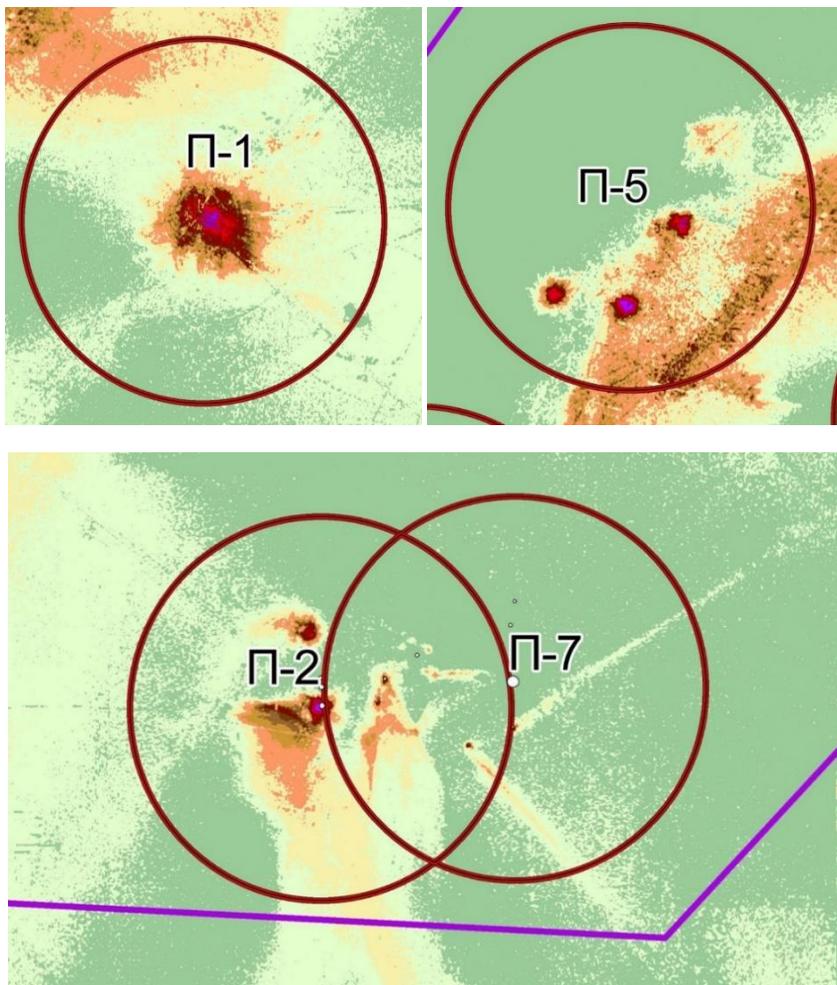


Рисунок 4 – Технические площадки на «Опытном поле»

Кроме этого, хорошо детектируются следы радиоактивных выпадений, ширина которых достигает нескольких километров (рис. 5).

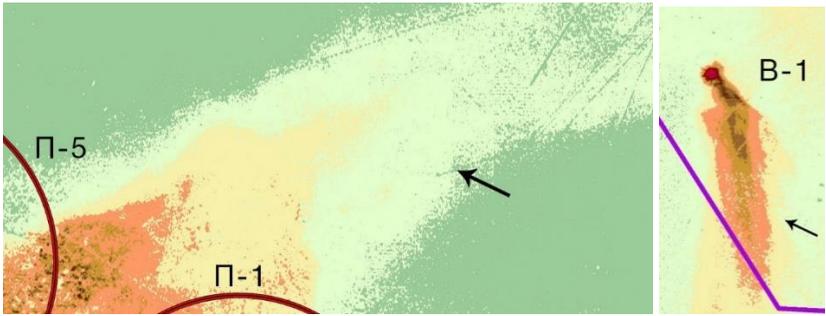


Рисунок 5 – Следы радиоактивных выпадений от ядерных испытаний

Эпицентры ядерных испытаний отчетливо проявились на карте площадного распределения ^{152}Eu (рис. 2). Здесь также можно отметить, что практически все эпицентры расположены в пределах технических площадок П-1, П-3, П-5, П-2, П-7 (рис. 6).

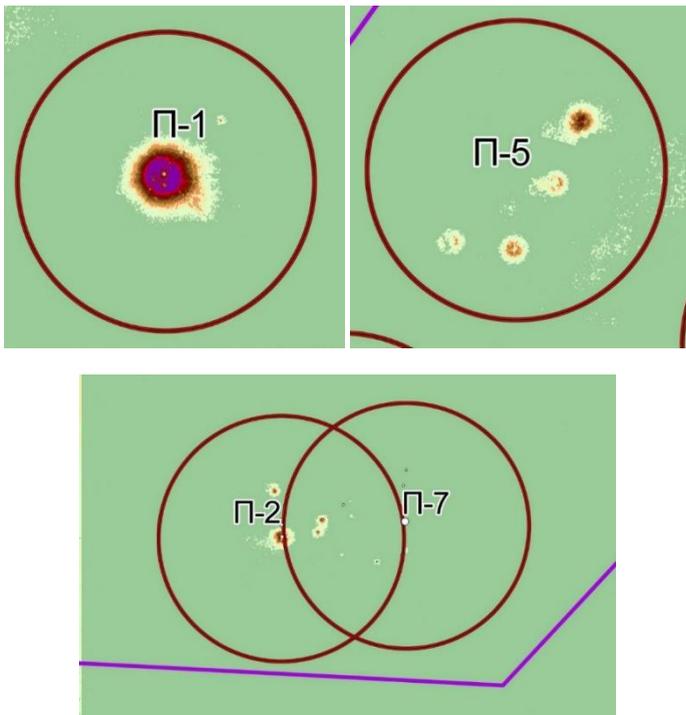


Рисунок 6 – Места эпицентров ядерных испытаний

Лабораторные анализы проб, отобранных в эпицентральных зонах, показали, что отношение радионуклидов $^{241}\text{Am}/^{137}\text{Cs}$ лежит в диапазоне 0,1-30. Достаточно малые коэффициенты соотношения $^{241}\text{Am}/^{137}\text{Cs}$ свидетельствует о принадлежности областей радиоактивного загрязнения цезием к ядерным испытаниям с высоким коэффициентом реализации ядерной реакции. Говоря «достаточно малые коэффициенты», подразумевается, что были зафиксированы и аномально высокие коэффициенты соотношения $^{241}\text{Am}/^{137}\text{Cs}$, достигающие значения 1000, т.е. имеются участки, где произошло диспергирование ядерного материала без ядерной реакции. Это могла быть как аварийная ситуация при проведении ядерного испытания, так и специальные неядерно-взрывные эксперименты с ядерным зарядом, так называемые гидроядерные или гидродинамические эксперименты.

Анализ площадного распределения ^{241}Am показал, что таких участков на площадке «Опытное поле» несколько, самый показательный из которых, это площадка П-2М (рис. 7).

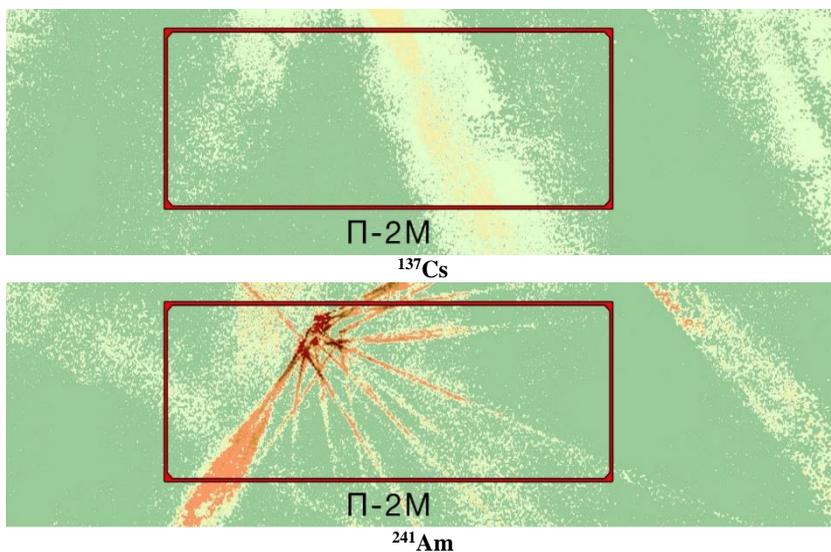


Рисунок 7 – Площадка П-2М

Как видно из рис. 7 радиоактивное загрязнение площадки П-2М обусловлено, в значительной степени, радионуклидом ^{241}Am . ^{137}Cs является привнесенным от других испытаний элементом. Кроме того, радиоактивное загрязнение характеризуется многочисленными следами выпадений.

Данный тип радиоактивного загрязнения местности имеет несколько характерных признаков, которые отличают его от радиоактивных выпадений от ядерных взрывов, и тем более, от глобальных выпадений.

Во-первых, это пространственные характеристики радиоактивного загрязнения. Речь идет не о размерах следов, так как очевидно, что следы выпадений от неядерно-взрывных экспериментов гораздо меньше следов от «классических» ядерных испытаний, так как мощность таких экспериментов не превышает сотен кг в тротиловом эквиваленте. Длина следов радиоактивных выпадений от гидроядерных и гидродинамических экспериментов достигает 3-5 км, ширина – <100 м (рис. 8). При этом, характерной особенностью является то, что ширина следа сохраняется от начала, и практически, до конца (~80-90 м), т.е. не наблюдается какого-либо значительного расширения радиоактивной полосы по мере удаления от эпицентра, как при ядерных взрывах большой мощности.

Кроме этого, направление следа выпадений от неядерно-взрывных экспериментов остается неизменным на всей его протяженности. Оба эти факта (неизменная ширина и направление следа) могут свидетельствовать о том, что формирование следов данного типа происходило без влияния метеорологических условий на момент испытаний. Другими словами, радиоактивные частицы от подобных испытаний переносились не ветром, а иным способом. По одному из предположений - направленным (коллимированным) взрывом.

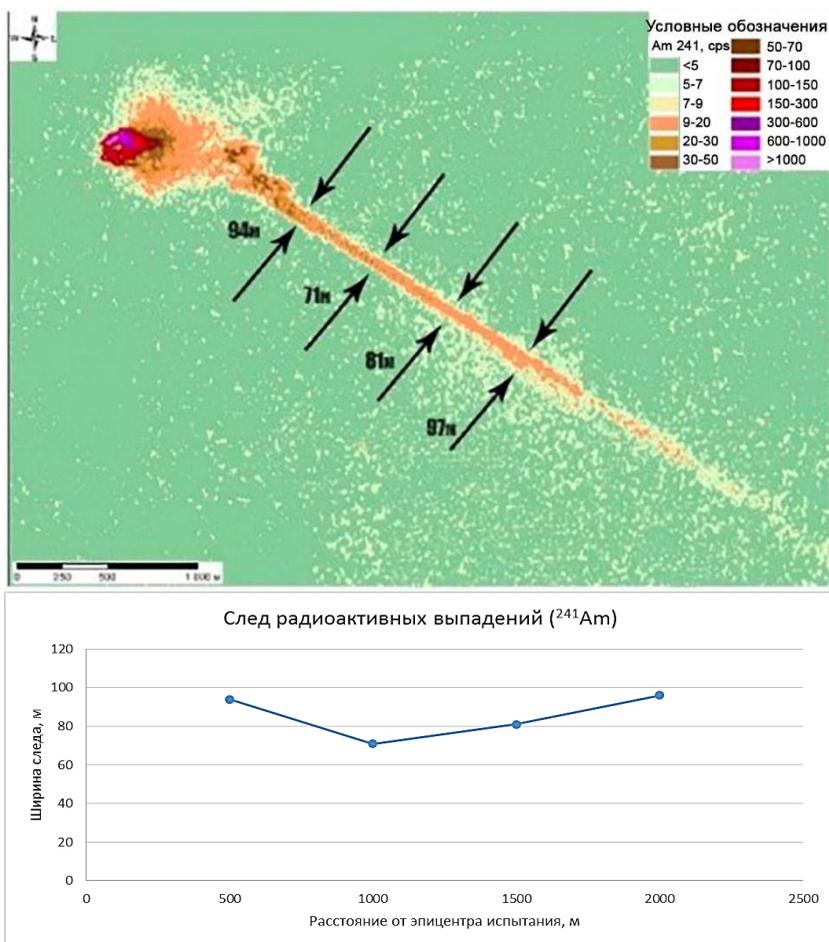


Рисунок 8 – След радиоактивных выпадений (^{241}Am) от эксперимента на технической площадке П-3

Второй отличительной особенностью следов радиоактивных выпадений от гидроядерных и гидродинамических экспериментов является их специфичный изотопный состав. Радиоактивное загрязнение местности в таких местах обусловлено исключительно радионуклидами, входящими в состав ядерного заряда – плутоний (его изотопы), ^{235}U , ^{241}Am . Другие радионуклиды (продукты деления и активации, такие как ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{60}Co , ^{152}Eu и др.) либо полностью отсутствуют, либо их количество незначительно, а сами они привнесены в результате выпадений от других ядерных испытаний.

Таким образом, можно утверждать, что в настоящее время «белых пятен» - неизвестных локальных участков радиоактивного загрязнения на площадке «Опытное поле», нет.

Кроме того, необходимо отметить, что на площадке «Опытное поле» проводились не только ядерные испытания с характерным радиоактивным загрязнением местности, но и другие эксперименты, где основными загрязняющими радионуклидами являются трансурановые элементы, а их концентрации чрезвычайно высокие.

Проведенные исследования площадного радиоактивного загрязнения «Опытного поля» являются основой для дальнейшей детальной характеристики площадки, включая пространственное распространение техногенных радионуклидов в глубину почвенного покрова, физико-химические особенности загрязнения и др.

Список литературы

1. Ядерные испытания СССР. Семипалатинский полигон. Под ред. Логачева В.А.-Москва.ИздАТ.1997 г.

ТРИТИЙ В ВОЗДУХЕ: ИСТОЧНИКИ И МЕХАНИЗМЫ ОБРАЗОВАНИЯ

О.Н. Ляхова, С.Н. Лукашенко, Л.В. Тимонова, З.Б. Сержанова,
А.М. Раимканова А.М., Н.В. Ларионова

*Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии»
Республиканского Государственного предприятия
«Национальный ядерный центр» Республики Казахстан
г. Курчатов, Казахстан*

Введение

Вследствие проведения ядерных испытаний на территории Семипалатинского испытательного полигона, наряду с наиболее известными техногенными радионуклидами ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am образовалось большое количество ^3H . Ввиду того, что испытания были различными по своему характеру, количество образовавшегося ^3H , а также пути его поступления в окружающую среду в каждом случае могли существенно отличаться.

Результаты исследований на территории полигона показали, что на сегодняшний день активность ^3H в поверхностных и подземных водах, растительности составляет от единиц до сотен тысяч Бк [4,5,6,14]. Речь идет об исследованиях трития, содержащегося в объектах окружающей среды в виде тритиевой воды. Однако, говоря о воздушной среде, нельзя с уверенностью утверждать, что весь ^3H в воздухе будет находиться только в такой форме. Согласно полученным данным, в местах проведения подземных ядерных испытаний активно идет процесс эманации ^3H с поверхности скальной породы и почвы [21]. Сделано предположение, что ^3H может поступать в атмосферу не только в виде тритиевой воды, но и в виде газообразных соединений ($T_{\text{газ}}$), таких как T_2 , HT , CH_3T и др. В связи с этим, при проведении радиоэкологической оценки территорий, подверженных тритиевому загрязнению, необходимо учитывать содержание обих форм ^3H в воздушной среде.

В настоящем докладе представлены результаты исследований источников и механизмов поступления НТО и $T_{\text{газ}}$ в воздушную среду Семипалатинского испытательного полигона.

Тритий (^3H) – изотоп водорода с периодом полураспада 12,4 года. Физические, химические и биохимические свойства ^3H таковы, что он свободно интегрируется в любой живой организм, эффективно включаясь в состав биологической ткани. ^3H обладает высокой миграционной способностью в природных средах, способен замещать водород во всех соединениях с кислородом, серой, азотом, легко проникая в протоплазму любой клетки, вызывая тем самым мутагенные изменения за счет собственного β -распада. В качестве сред, аккумулирующих Т, выступают вода, почва, растения, животные, продукты питания и тело человека. В итоге, весь образовавшийся ^3H , участвуя в гидрологическом природном цикле, поступает в атмосферу.

Вследствие проведения испытаний ядерного и термоядерного оружия, в 40-ых годах прошлого века произошло резкое увеличение поступления техногенного ^3H в окружающую среду. В середине 40-х годов содержание ^3H в дождевой воде увеличилось в тысячи раз, а в начале 50-ых (после первого термоядерного взрыва), в атмосферу Земли было введено количество ^3H более чем в 60-190 раз превысившее его естественный уровень.

Общепринято считать, что влияние радиационно-опасных объектов (РОО) определяется присутствием в воздухе таких техногенных радионуклидов, как ^{85}Kr , ^{60}Co , ^{54}Mn , ^{137}Cs , ^{144}Ce , ^{90}Sr , ^{133}Xe , ^{131}I и др. [12,19]. Однако, в современной литературе все чаще встречается термин «тритиевая проблема», которая связана с всевозрастающим количеством ^3H , поступающего в окружающую среду с радиоактивными выбросами и сбросами [2,3,16,20]. По общим оценкам, предприятия атомной промышленности и заводы по переработке ядерного горючего выбрасывают в окружающую среду в год около 15 ПБк ^3H в виде жидких отходов и 600 ТБк ^3H - в виде газообразных соединений [18,22]. Любые незапланированные выбросы на АЭС могут увеличить общее содержание ^3H в воздухе примерно на 60%, что может повлечь за собой увеличение дозовой нагрузки на персонал и население, проживающее на прилегающих территориях, при попадании ^3H в организм при вдыхании и через кожные покровы.

Помимо прямых выбросов с РОО, ^3H может поступать в воздух в результате различных механизмов трансформации,

происходящих в природной среде, так называемое вторичное перераспределение. Основными из таких механизмов являются процессы испарения с поверхности воды, содержащей ^3H , процессы эманации с поверхности почвы и процессы жизнедеятельности растений, а также различные биологические процессы, происходящие в почве [8, 17]. В результате, ^3H может поступать в воздушную среду в составе различных органических и неорганических соединений.

Однако, при проведении исследований содержания ^3H в воздушной среде основное внимание уделяется окисленной форме НТО и, зачастую, полностью упускается из внимания газообразные соединения трития ($\text{T}_{\text{газ}}$).

В целом, подход к исследованиям ^3H в воздушной среде нуждается в серьезной доработке. Во-первых, нет единого методологического подхода, а единичные и несистематические измерения не позволяют выявить реальных масштабов тритиевого загрязнения. Во-вторых, вопросы, связанные с особенностями перераспределения ^3H в приземные слои атмосферы до сих пор остаются малоизученными.

Материалы и методы исследования

Все исследования проведены на территории Семипалатинского испытательного полигона (СИП) в местах проведения ядерных испытаний. Это площадки «Дегелен» и «Балапан», где осуществлялись подземные ядерные взрывы (ПЯВ) в штольнях и скважинах, воронка «Атомного» озера, образовавшаяся в результате проведения экскавационного ядерного взрыва и русло р. Шаган, генетически связанное с «Атомным» озером, характеризующееся высоким содержанием ^3H в объектах окружающей среды.

Основным объектом исследования являлся воздух (атмосферный и почвенный). Дополнительно, в зависимости от поставленных задач, на разных этапах работы исследовалась вода (поверхностная и подземная), грунт и растительность.

Выделение различных форм ^3H из воздуха проводилось при помощи коллектора ^3H , который методом 2-х стадийного последовательного выделения позволяет отдельно улавливать ^3H в виде НТО и $^3\text{H}_{\text{газ}}$. Принципиальная схема работы коллектора представлена на рис. 1.

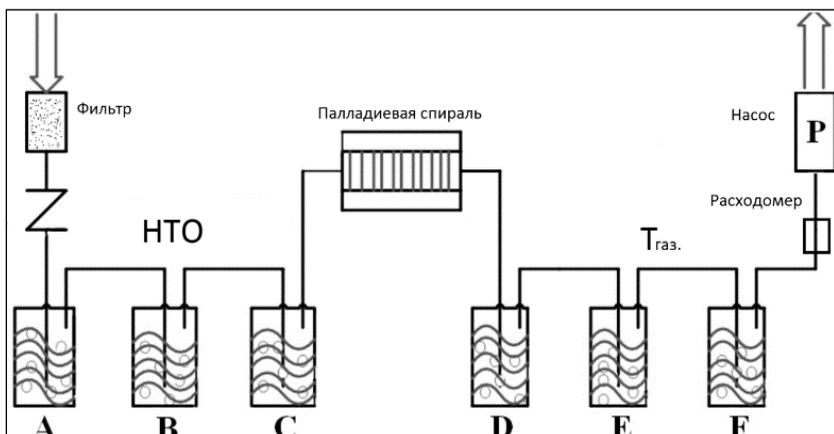


Рисунок 1 – Схема отбора проб воздуха

Определение форм нахождения ^3H в грунтах и растительности проводили различными физико-химическими методами. Формы ^3H , содержащегося в виде свободной воды, выделяли методом дистилляции и выщелачивания, органически-связанные формы ^3H в грунтах - методом автоклавного разложения, в растениях – при помощи специальной системы пробоподготовки Sample Oxidizer, позволяющей извлекать ^3H из органических образцов.

Определение удельной активности ^3H в подготовленных образцах проводилось при помощи жидкосцинтилляционного спектрометра Quantulus 1200, позволяющего определять ^3H в жидких образцах на уровне 1-2 Бк/л.

Результаты и их обсуждение

Исследование уровня и характера распределения НТО в воздушной среде

Распределение НТО в системе «вода-воздух»

Процесс перераспределения ^3H в воздух может быть очень быстрым, если речь идет о ^3H , который содержится в составе воды – НТО. По большей части такие формы ^3H свойственны для поверхностных вод, когда ^3H может напрямую поступать в воздух вследствие испарения.

На территории СИП существует ряд водных объектов с высоким содержанием ^3H в воде. Наиболее загрязненные из них – ручьи и штольневые водотоки площадки «Дегелен» и р. Шаган.

Удельная активность НТО в воде штольневых водотоков и ручьях площадки «Дегелен» составляет от 30 до 400 кБк/л и остается практически на одном уровне на протяжении многих лет [7].

Похожая картина наблюдается и в отношении р. Шаган, где удельная активность ^3H в воде в течение нескольких лет исследования изменяется в пределах от 20 до 500 кБк/л, в зависимости от года и сезона [4].

Исследование уровня и характера распределения НТО в воздухе в продольном и поперечном направлении относительно русла таких водотоков показало, что с увеличением расстояния от мест с максимальной концентрацией ^3H в воде, концентрация НТО в воздухе снижается более чем на порядок [21]. Экспериментально установлено наличие прямой зависимости концентрации НТО в воздухе от концентрации НТО в воде. Полученные данные хорошо согласовывались с аналитическими расчетами (рис. 2)

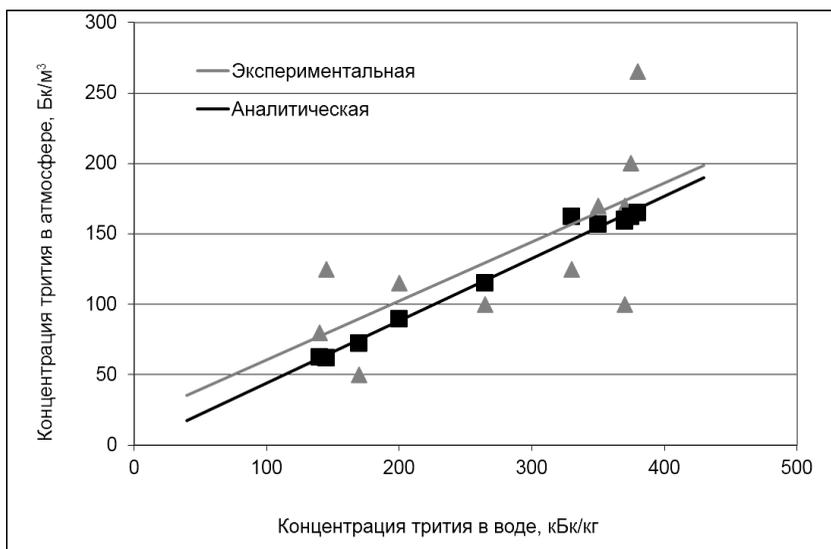


Рисунок 2 – Соотношение концентрации НТО в системе вода-воздух

Установлено, что одним из основных источников поступления НТО в воздух является вода, а в качестве механизма образования выступает прямое испарение с ее поверхности в атмосферу.

Распределение НТО в системе «растения-воздух»

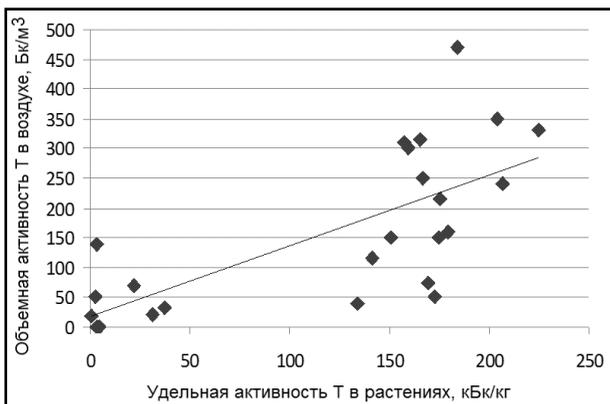
Помимо прямого поступления с поверхности воды, НТО может переходить в воздух в результате различных механизмов трансформации, происходящих в природной среде. Одним из таких механизмов являются процессы жизнедеятельности растений. Для проверки и подтверждения данного факта исследования проводились в местах наличия растительного покрова, загрязненного ^3H , на значительном удалении от поверхностных водных объектов. Анализ полученных данных показал наличие хорошей корреляционной зависимости между содержанием НТО в свободной воде растений и в воздухе, а также зависимость содержания НТО в воздушной среде от продуктивности растительного покрова, загрязненного ^3H (рис.3).

Выявлено, что одним из источников поступления НТО в воздух могут являться растения, загрязненные ^3H , а в качестве механизма поступления выступает процесс транспирации [8].

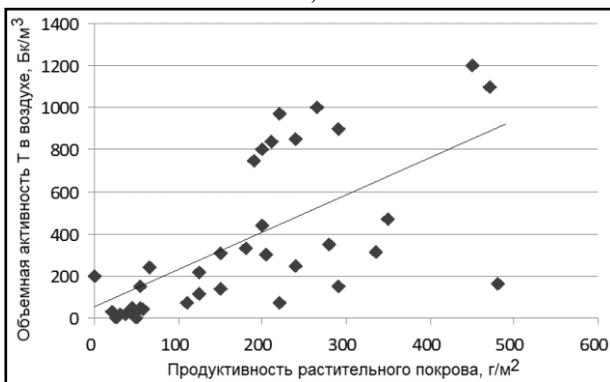
Распределение НТО в системе «грунт-воздух»

Другим механизмом поступления НТО в воздушную среду могут процессы трансформации ^3H , происходящие в почве. Исследования проводились в месте расположения «Атомного» озера, которое является воронкой, образовавшей в результате проведения ядерного испытания. Глубина воронки порядка 80 м, диаметр порядка 400 м.

Максимальное содержания НТО в воде на поверхности озера составляет 1500 Бк/л. Однако исследования показали, что содержание НТО в воздухе составляет от 12 до 90 Бк/м³ (Ляхова, 2013). Учитывая концентрацию НТО в воде и высоту навала воронки, сделан вывод о наличии иного источника поступления и механизмов образования НТО в воздухе на данном участке.



а)



б)

Рисунок 3 – Соотношение концентрации НТО в системе растения-воздух

Установлено, что содержание ^3H в грунтах навала составило порядка 65000 Бк/кг [15]. Эксперименты, проведенные в лабораторных условиях, показали, что ^3H хорошо выщелачивается из грунта. На основании анализа все полученных данных был сделан вывод, что на территории «Атомного» озера НТО поступает в воздух по схеме, показанной на рис. 4.



Рисунок 4 – Схема перераспределения НТО в системе почва-воздух

Сделано предположение, что изначально происходит выщелачивание НТО из грунта в почвенную влагу, а затем испарение с поверхности почвы в воздух.

Полученный вывод подтвержден экспериментальными исследованиями, в ходе которых установлена хорошая корреляционная зависимость между содержанием НТО в почвенном и атмосферном воздухе (рис. 5) [8].

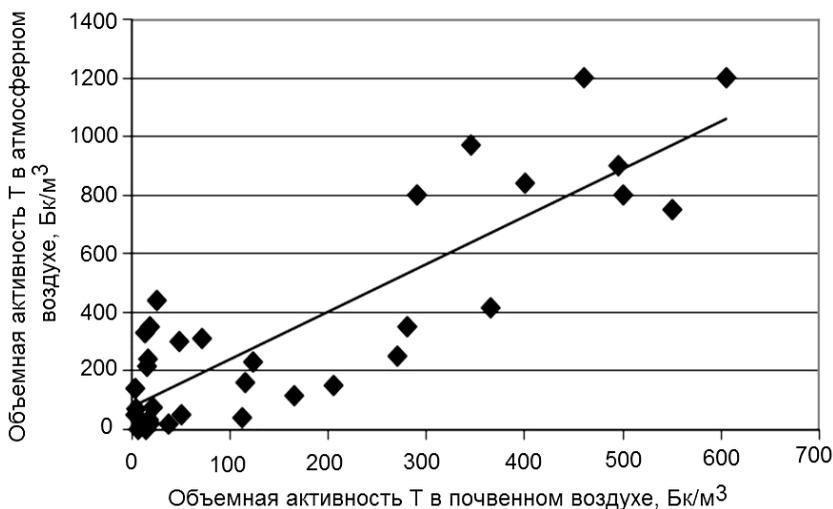


Рисунок 5 – Соотношение концентрации НТО в системе почва-воздух

Определено, что в данном случае источником поступления НТО в воздух является грунт, а в качестве механизма образования выступает процесс выщелачивания НТО из грунта в почвенную влагу, с последующим испарением с поверхности грунта.

Распределение НТО в системе «подземные воды – воздух»

Исследования уровня содержания НТО в атмосферном и почвенном воздухе проводились на площадке «Балапан», в местах расположения боевых скважин. На приустьевых участках скважин отсутствуют поверхностные водные объекты, содержание ^3H в грунтах и растительности незначительное (единицы Бк/кг).

Согласно полученным результатам, содержание НТО в атмосферном воздухе достигало 70 Бк/м^3 , а в почвенном – порядка 300 Бк/м^3 . Сделан вывод о возможном влиянии загрязненных ^3H грунтовых вод на тритиевое загрязнение

воздушной среды исследуемой территории. Анализ полученных данных показал, что удельная активность НТО в подземных водах может составлять до 30 000 Бк/л, а в трещинных водах до 400 Бк/л и более [1,14]. Вероятно, что в данном случае содержание НТО в воздухе связано с наличием развитой зоны грунтовых вод, содержащих в своем составе НТО. Механизмом перераспределения НТО в такой системе могут являться процессы капиллярного поднятия грунтовых вод с последующим испарением с поверхности грунта.

Исследование уровня и характера распределения $T_{\text{газ}}$ в воздушной среде

Содержание $^3\text{H}_{\text{газ}}$ в воздушной среде в местах проведения подземных ядерных испытаний

На территории площадки «Балапан» находится ряд боевых скважин, которым присвоен термин «критические» ввиду выявления эффектов подземной газификации (повышенное содержание газов в почвенном воздухе - CO_2 , CH_4 , H_2S и др.), а также в результате механических последствий проведения ПЯВ (изменение рельефа, образование провальных воронок и т.д.) [10].

Именно такие скважины были определены для исследования содержания $^3\text{H}_{\text{газ}}$ в воздушной среде. Основанием послужило предположение, что $^3\text{H}_{\text{газ}}$ наряду с другими газами, также может поступать из полости скважин в атмосферу.

В результате исследований, на приустьевых участках 2-х из 6-ти «критических» скважин были зафиксированы численные значения $^3\text{H}_{\text{газ}}$ в атмосферном и почвенном воздухе. Объемная активность $^3\text{H}_{\text{газ}}$ составила от 0,5 Бк/м³ до 40 Бк/м³ [9].

Исследования были продолжены на приустьевых участках скважин, не относящихся к «критическим». В результате установлено, что $^3\text{H}_{\text{газ}}$ в воздушной среде в местах расположения скважин присутствует практически повсеместно [6]. В большинстве случаев, его содержание превышает содержание НТО в воздухе.

На данный момент, не удалось достоверно определить источники образования и поступления $^3\text{H}_{\text{газ}}$ в воздух на данной территории. Сделано предположение, что в данном случае могут быть задействованы некие процессы, происходящие в полостях скважин.

Зависимость содержания $^3\text{H}_{\text{газ}}$ в воздушной среде от процессов жизнедеятельности растений

Результаты, при исследованиях на площадке «Балапан», дали основание к проведению исследования уровня и характера распределения $^3\text{H}_{\text{газ}}$ на других радиоактивно-загрязнённых участках СИП. Исследования были проведены в русле штольневых водотоков на площадке «Дегелен» и в русле р. Шаган.

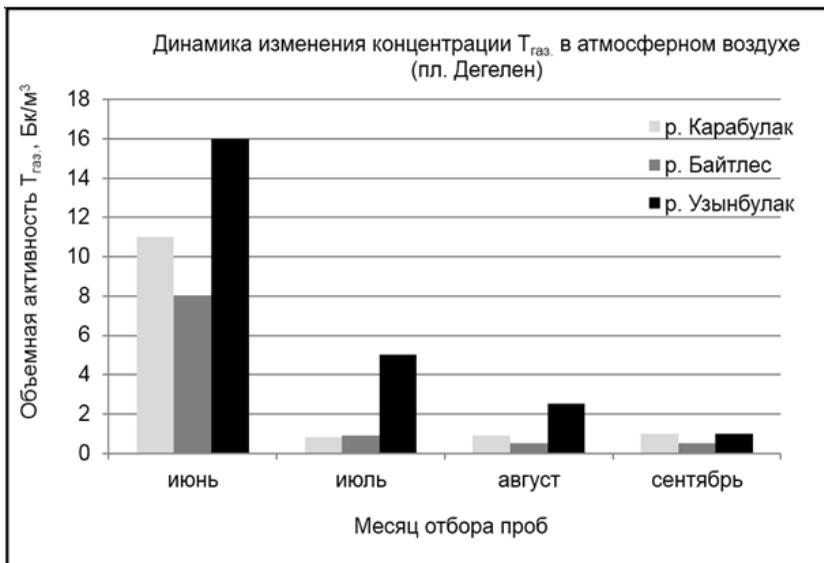
Анализ полученных данных показал присутствие $^3\text{H}_{\text{газ}}$ в воздушной среде обоих участков исследования, приблизительно в одних пределах. Объемная активность $^3\text{H}_{\text{газ}}$ в атмосферном воздухе составила от 1,4 до 12 Бк/м³, в почвенном воздухе – от 0,8 до 16 Бк/м³ [9].

Так как наличие НТО в воде не могло повлиять на содержание $^3\text{H}_{\text{газ}}$ в воздухе, было сделано предположение о существовании связи $^3\text{H}_{\text{газ}}$ с различными биологическими процессами. В первую очередь, речь шла о процессах жизнедеятельности растений.

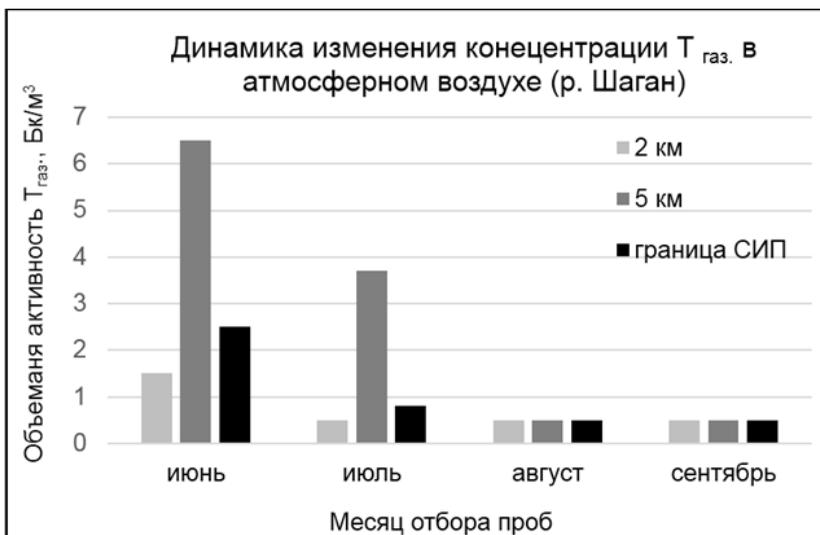
Исследования динамики концентрации $^3\text{H}_{\text{газ}}$ в атмосферном воздухе отчасти подтвердили данное предположение. Максимальная концентрация $^3\text{H}_{\text{газ}}$ в воздухе наблюдается в начале летнего периода. По мере завершения летнего сезона, концентрация $^3\text{H}_{\text{газ}}$ в воздухе значительно снижается (рис. 6).

Для установления возможной взаимосвязи $^3\text{H}_{\text{газ}}$ с процессом жизнедеятельности растений, был исследован уровень и динамика концентрации ОСТ в растениях на данных участках. Согласно полученным данным, содержание ОСТ в растениях оставалось практически на одном уровне на протяжении всего летнего периода и составляло от 7 до 13 кБк/кг.

Вероятнее всего, в данном случае задействован механизм трансформации ^3H из ОСТ в $^3\text{H}_{\text{газ}}$, скорость которого будет напрямую зависеть от циклов жизнедеятельности растений (образование летучих органических соединений). По мере наступления холодов физиологические процессы в растениях замедляются, что в свою очередь провоцирует замедление процессов образования $^3\text{H}_{\text{газ}}$ и его поступления в воздушную среду.



а)



б)

Рисунок 6 – Динамика концентрации ${}^3\text{H}_{\text{газ}}$ в воздухе

При проведении исследований содержания ${}^3\text{H}_{\text{газ}}$ в воздушной среде «Атомного» озера, в местах где установлены высокие концентрации ${}^3\text{H}$ в почве также были зафиксированы численные значения ${}^3\text{H}_{\text{газ}}$, в ряде случаев объемная активность достигала достаточно высоких значений, до 70 Бк/м³.

Для выявления источников и механизмов образования ${}^3\text{H}_{\text{газ}}$ в воздухе на данной территории было проведено исследования форм нахождения ${}^3\text{H}$ в грунтах, а также содержания ОСТ в растениях.

Установлено, что ${}^3\text{H}$ в грунтах содержится не только в составе свободной воды, но и в связанных формах. То же самое было установлено и для растений. Содержание ОСТ в грунтах составило более 10 кБк/кг, в растениях порядка 0,4 кБк/кг [11].

Полученные данные указывают на то, что концентрация ${}^3\text{H}_{\text{газ}}$ в воздухе зависит от процессов, происходящих не только в процессе жизни растений, но и в процессе их отмирания и разложения (образование различных летучих органических соединений – метан, водород и др.).

Заключение

При рассмотрении источников и механизмов образования НТО в воздушной среде на первый план выходят такие процессы как испарение с поверхности воды, испарение с поверхности почвы, процессы выщелачивания.

Рассматривая ${}^3\text{H}_{\text{газ}}$ в воздухе, в первую очередь необходимо обращать внимание на биологические процессы - процессы жизнедеятельности растений и различные биологические процессы, происходящие в почве, в результате которых образуется широкий класс органических соединений с различными физико-химическими свойствами (связанные, летучие, растворимые и т.д.). Если растения и почва содержат ${}^3\text{H}$, эти процессы способствуют трансформации различных его форм в газообразные соединения.

В целом, процесс перераспределения ${}^3\text{H}$ в атмосферу может быть различным в зависимости от среды, в которой он содержится, от форм его нахождения в ней, а также от механизмов трансформации или образования ${}^3\text{H}$ в различных средах. В случае исследований на СИП немаловажную роль в процессах образования и поступления ${}^3\text{H}$ в воздух играет характеристика проведенного ядерного испытания.

Благодарности

Авторы выражают глубокую благодарность коллективу Института радиационной безопасности и экологии за всестороннюю помощь в проведении исследований.

Список литературы

1. Актаев М.Р., Айдарханов А.О. и др. Определение источников формирования загрязненных подземных вод площадки «Балапан» на Семипалатинском испытательном полигоне / М.Р. Актаев, А.О. Айдарханов, О.Н. Ляхова, С.Н. Лукашенко // Материалы V Международной конференции «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека» / Томск, 2016. - С. 43
2. Болсуновский А. Я., Бондарева Л. Г. Тритий в водоемах бассейна реки Енисей в зоне влияния Горно-химического комбината Минатома РФ // Экология, 2005, N 1. - С. 59-63
3. Вакуловский С.М., Катрич И.Ю., Малахов С.Г., Рослый Е.И., Чумичев В.М., Шкуро В.Н. Содержание ^{90}Sr , ^{137}Cs и трития в Балтийском море в 1972 г. Атомная энергия, т.39, 1975, № 3. - С.183-185.
4. Есимбеков, А. Ж. Определение и локализация каналов поступления трития в воды реки Шаган / А. Ж. Есимбеков, С. Н. Лукашенко, С. Б. Субботин [и др.] // Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана: сб. тр. Института радиационной безопасности и экологии за 2011–2012 гг.– Павлодар: Дом печати, 2013. Вып. 4, Т. 2. – С. 25–40.
5. Ларионова Н.В. Исследование возможности использования растений в качестве показателей содержания ЗН в грунтовых водах / Ларионова Н.В., Лукашенко С.Н., Субботин С.Б [и др.]. // Вестник НЯЦ РК: периодический научно-технический журнал. - Курчатов, 2009. - Вып. 2. – С.18 -25
6. Лукашенко С.Н. и др. Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана [Оптимизация исследований территорий Семипалатинского испытательного полигона с целью их передачи в хозяйственный оборот] / под рук. Лукашенко С. Н. – Вып. 5. – Павлодар: Дом печати, 2015. – 357 с.
7. Лукашенко, С. Н. / Исследование уровня и характера распределения трития в объектах окружающей среды на территории СИП / С. Н. Лукашенко, О.Н. Ляхова, С. Б. Субботин, А. О. Айдарханов, А. М. // Ядерный потенциал Республики Казахстан: сборник докладов / Ассоциация «Ядерное общество Казахстан». Алматы, 2008. – С. 99-106.
8. Ляхова О.Н. Исследование уровня и характера распределения трития в воздушной среде на территории Семипалатинского испытательного полигона: Автореф. Дис. канд. биол. наук / О.Н. Ляхова. – Обнинск, 2013. – 22 с.

9. Ляхова О.Н., Тимонова Л.В., Лукашенко С.Н. и др. Уровень содержания трития в воздушной среде Семипалатинского испытательного полигона / О.Н. Ляхова, Л.В. Тимонова, С.Н. Лукашенко и др. // Материалы V Международной конференции «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека» / Томск, 2016. - С. 399
10. Романенко В.В., Субботин С.Б. и др. Исследование характера газоносности на площадке «Балапан» / В.В. Романенко, С.Б. Субботин, С.Н. Лукашенко, Л.В. Чернова // [Сборник трудов Института радиационной безопасности и экологии за 2010 г.] / под рук. Лукашенко С.Н. – Вып. 3. – Павлодар: Дом печати, 2011. – С. 275-295
11. Сержанова З.Б., Айдарханова А.К. и др. Оценка распределения форм нахождения трития в грунтах радиационно-опасных объектов Семипалатинского полигона / З.Б. Сержанова, А.К. Айдарханова и др. // Материалы V Международной конференции «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека» / Томск, 2016. С. 587
12. Старков В.Д. Радиационная экология / В.Д. Старков, В.И. Мигунов – Тюмень: ФГУ ИПП, изд. 2, 2007. - 396 с.
13. Субботин С.Б. Оценка возможности последствий катастрофического характера на территории площадки «Балапан» / С.Б. Субботин, С.Н. Лукашенко // Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана: сб. тр. Института радиационной безопасности и экологии за 2007–2009 гг. – Павлодар : Дом печати, 2010. – Вып. 2. – С. 401–450.
14. Субботин С.Б. Выявление путей миграции техногенных радионуклидов за пределы испытательной площадки «Балапан» / С.Б. Субботин, С.Н. Лукашенко [и др.]. // [Сборник трудов Института радиационной безопасности и экологии за 2010 гг.] / под рук. Лукашенко С.Н. – Вып. 3. – Павлодар: Дом печати, 2011. – С.161-233
15. Тимонова Л.В. Исследование содержания трития в почве в местах проведения ядерных испытаний на территории Семипалатинского испытательного полигона / Тимонова Л.В., Ляхова О.Н., Лукашенко С.Н., Айдарханов А.О. // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2015. – Том 55, №6. – С. 667-672
16. Чеботина, М.Я., Николин, А.О., Радиоэкологические исследования трития в Уральском регионе / М.Я. Чеботина, А.О. Николин, научное издание // Екатеринбург: УрО РАН. ISBN 5-7691-1519-X, 2005. – 89 с.
17. Charles E. Murphy, Jr. Tritium transport and cycling in the environment /Health Phys. 65(6): 683-697, 1993
18. Harris, J., Miller, D. Tritium recapture behavior at a nuclear power reactor due to airborne releases // Health Physics. – 2008. – Vol. 95(2) – P. 203–212.

19. IAEA Technical Reports. Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments / Series No. 472, IAEA, Vienna, 2010 – 191 c.
20. Jean-Baptiste, P., Baumier, D., Fourre, E. The distribution of tritium in the terrestrial and aquatic environmental of the Greys-Malville nuclear power plant // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2007. – Vol. 94. - P. 107-118.
21. Lyakhova, O.N. et al. Contamination mechanisms of air basin with tritium in venues of underground nuclear explosions at the former Semipalatinsk test site /O.N. Lyakhova // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2012. - Vol. 113. - P. 98–107.
22. Report of the independent Advisory Group on Ionising Radiation. Review of Risks from Tritium. / Documents of the Health Protection Agency Radiation, Chemical and Environmental Hazards, November, 2007. Available from: – http://www.rachel.org/lib/tritium_risks.070601.pdf.

ИСКУССТВЕННЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ В РАСТИТЕЛЬНОМ ПОКРОВЕ НА ТЕРРИТОРИИ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА

Ларионова Н.В., Лукашенко С.Н.

*Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии»
Республиканского Государственного предприятия
«Национальный ядерный центр» Республики Казахстан
г. Курчатов, Казахстан*

Введение

С момента закрытия Семипалатинского испытательного полигона (СИП) казахстанскими учеными совместно с международным научным сообществом получен большой объем информации относительно текущей радиационной обстановки на его территории. Выявлены все значимые участки радиоактивного загрязнения, основные пути и механизмы текущего и потенциального распространения радиоактивных веществ [11]. Сравнительно менее изученным достаточно долгое время оставался вопрос миграции радионуклидов в растения. Отдельные исследования в этом направлении встречались в работах сотрудников Национального ядерного центра Республики Казахстан [5,6,16,18]. Однако, в силу отсутствия на тот момент соответствующих поставленных задач, приведенные результаты не систематичны и охватывают лишь небольшую часть территорий СИП.

Систематические исследования искусственных радионуклидов в растительном покрове СИП были начаты в 2007 г. В настоящем докладе представлены результаты исследований широкого спектра искусственных радионуклидов (^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^3H) в растительном покрове на всех известных участках СИП, характеризующихся различными типами радиоактивного загрязнения.

Основное радиоактивное загрязнение СИП обусловлено наземными испытаниями и подземными испытаниями, (в случаях выхода радиоактивных веществ на земную поверхность). Основная часть образовавшихся при наземных взрывах радионуклидов осталась в эпицентрах испытаний, а некоторая часть, связанная со сравнительно небольшими частицами грунта или расплавленных пород, была отнесена ветром на

значительные расстояния. Одним из наиболее масштабных и специфических выходов радиоактивных веществ из мест проведения подземных испытаний является вынос радионуклидов водотоками из котловых полостей штолен на площадке «Дегелен», где в условиях дополнительного увлажнения сформировалось сложное радиоактивное загрязнение луговых экосистем. Еще большими масштабами на территории СИП характеризуется загрязнение ^3H грунтовых вод, зона распространения которых зачастую выходит за пределы границ бывших испытательных площадок. Сравнительно меньшим по площади, но также довольно специфическим можно назвать радиоактивное загрязнение, образовавшееся в результате экспериментов по испытанию боевых радиоактивных веществ (БРВ).

Материалы и методы исследования

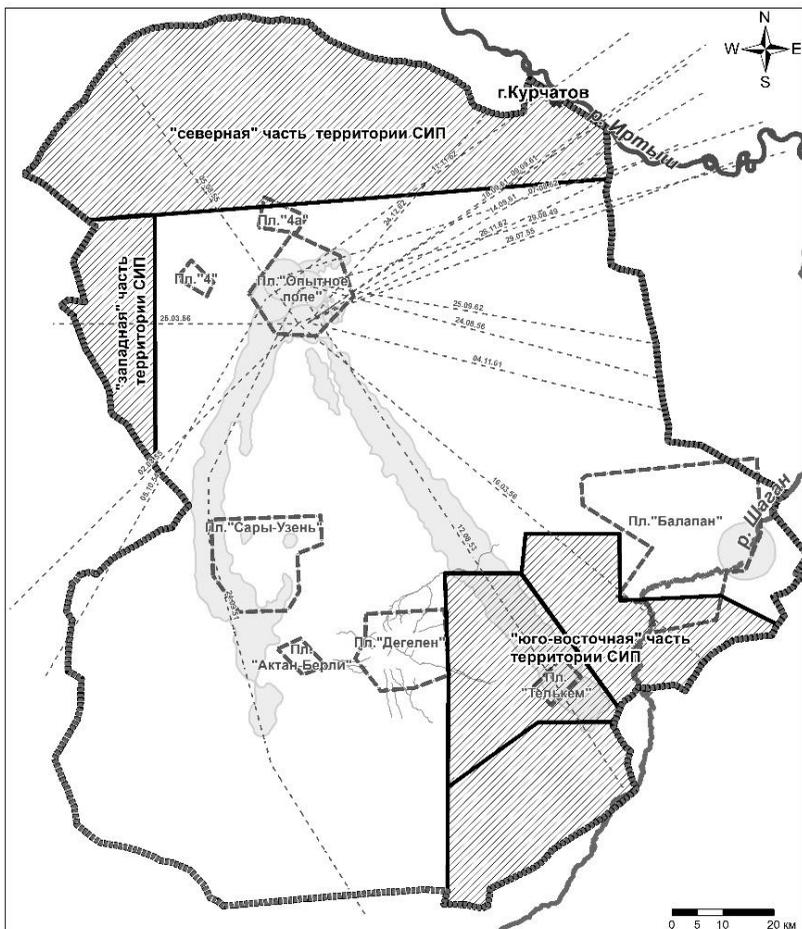
Исследования по оценке уровней и характера загрязнения растительного покрова искусственными радионуклидами ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^3H проводились на участках с различным характером радиоактивного загрязнения:

- в эпицентрах наземных ядерных испытаний (площадка «Опытное поле», объект «Атомное» озеро);
- на «следах» радиоактивных выпадений (зона прохождения радиоактивного облака от взрыва 1953 г.);
- на условно «фоновых» территориях («северная», «западная» и «юго-восточная» части СИП);
- в местах испытаний БРВ (площадка «4а»);
- в зонах радиоактивных водотоков (район штолен № 176 и 177 на площадке «Дегелен»);
- в зонах, загрязненных ^3H грунтовых вод (территория, прилегающая к площадке «Дегелен», район р. Шаган).

Отбор проб растений производился с площади $\sim 2 \text{ м}^2$. Для оценки параметров накопления сопряжено с растениями отбирались смешанные пробы почвы (методом конверта на глубину 5 см (для светло-каштановых почв степной зоны) и 20 см (для луговых почв, только на площадке «Дегелен»). Растения отбирались по видовому составу и в виде смешанных образцов степного и лугового разнотравья. Для оценки содержания ^3H выбор исследуемых видов растений был основан на их

классификации по отношению к влаге (гигрофиты, мезофиты, ксерофиты, фреатофиты).

Определение удельной активности ^{137}Cs и ^{241}Am проводилось на гамма-спектрометре Canberra GX-2020 [15], ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ радиохимическим выделением с последующим измерением на бета-спектрометре TRI-CARB 2900 TR и альфа-спектрометре Canberra, мод.7401 соответственно [14]. Для определения ^{90}Sr также применялся бета-спектрометр «Прогресс» [13]. Определение удельной активности ^3H в образцах проводилось при помощи жидкосцинтилляционного спектрометра "TriCarb 2900 TR" [19]. Концентрация ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am и $^{239+240}\text{Pu}$ определялась в золе, с последующим пересчетом на сухое вещество. Содержание радионуклида ^3H в растениях оценивалось в свободной воде, полученной из конденсата посредством специального запатентованного изобретения, представляющего собой герметичную емкость для загрузки проб, снабженную охлаждаемой поверхностью и емкостью для сбора влаги, испаряемой растениям [4]. Предел обнаружения по ^{137}Cs составлял 1 Бк/кг (для проб растений) и 4 Бк/кг (для проб почвы), ^{241}Am – 0,3 Бк/кг и 1 Бк/кг, $^{239+240}\text{Pu}$ – 0,1 Бк/кг и 1 Бк/кг, ^{90}Sr – 1 Бк/кг и 5 Бк/кг соответственно. Погрешность измерений для ^{137}Cs и ^{241}Am не превышала 10-20 %, ^{90}Sr – 15-25 %, $^{239+240}\text{Pu}$ – 30%. Предел обнаружения ^3H составлял 12 Бк/кг.



Условные обозначения

- граница СИП
- исследованные условно «фоновые» территории
- границы испытательных площадок
- изолиния 0.3 Ки/кв. км, Cs-137
- предполагаемая ось от ядерного испытания

Рисунок 1 – Схема исследуемых территорий СИП

Результаты и их обсуждение

В табл. 1 представлены диапазоны значений удельной активности ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am и $^{239+240}\text{Pu}$ в почвах исследуемой территории.

Таблица 1 - Диапазон значений удельной активности радионуклидов в почвах

Исследуемая территория	Удельная активность радионуклидов в почвах, Бк/кг			
	^{137}Cs	^{90}Sr	^{241}Am	$^{239+240}\text{Pu}$
эпицентры наземных испытаний	$n \cdot 10^1 - n \cdot 10^3$	$<100 - n \cdot 10^4$	$n \cdot 10^1 - n \cdot 10^5$	$n \cdot 10^2 - n \cdot 10^6$
«следы» радиоактивных выпадений	$n \cdot 10^1 - n \cdot 10^2$	$n \cdot 10^1 - n \cdot 10^3$	$n \cdot 10^{-1} - n \cdot 10^1$	$n \cdot 10^{-1} - n \cdot 10^2$
условно «фоновые» территории	$n \cdot 10^{-1} - n \cdot 10^1$	$n \cdot 10^{-1} - n \cdot 10^1$	$<1 - n \cdot 10^{-1}$	$<1 - n \cdot 10^1$
радиоактивные водотоки	$n \cdot 10^1 - n \cdot 10^5$	$n \cdot 10^2 - n \cdot 10^5$	$<1 - n \cdot 10^2$	$n \cdot 10^1 - n \cdot 10^4$
места испытаний БРВ	$<4 - n \cdot 10^2$	$n \cdot 10^4 - n \cdot 10^6$	-	-

Для количественной оценки поступления радионуклидов из почвы в растения использовался, один из наиболее широко применяемых показателей – коэффициент накопления (Кн) – отношение содержания радионуклида в единице массы растений и почвы соответственно.

Площадка «Опытное поле»

Для выявления количественных параметров переноса ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am из почвы в наземную часть растений в местах проведения наземных ядерных испытаний исследования проводились на площадке «Опытное поле» на 12 эпицентрах, выявленных в 2010 г., и на радиоактивно-загрязненных участках между эпицентрами – в местах ближних выпадений от наземных испытаний [9].

Определенные различия в накоплении радионуклидов растениями отмечены на отдельных эпицентрах. На рис. 2 представлены средние Кн ^{137}Cs и ^{90}Sr для ковыля (*Stipa capillata*).

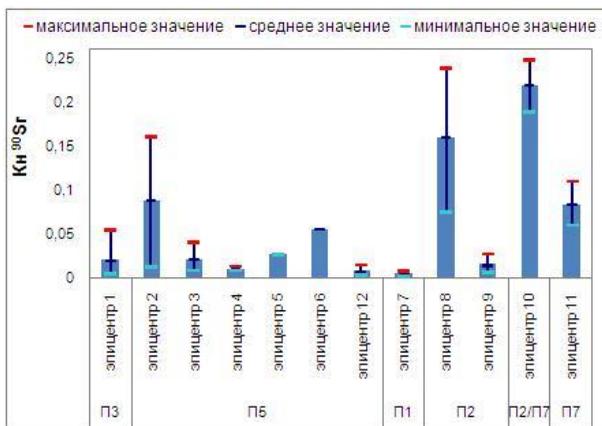
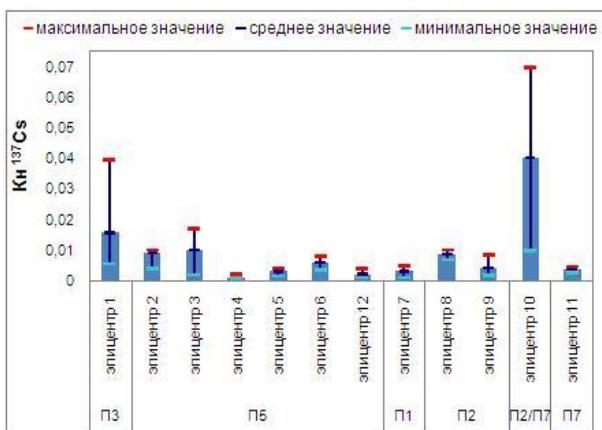
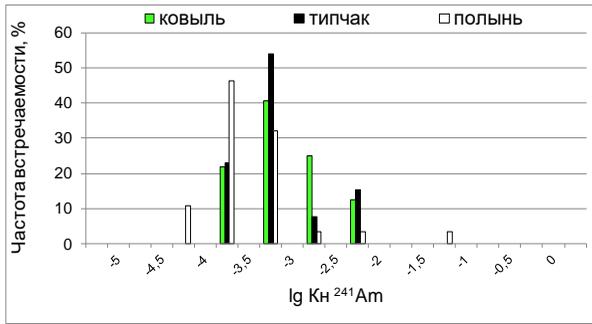


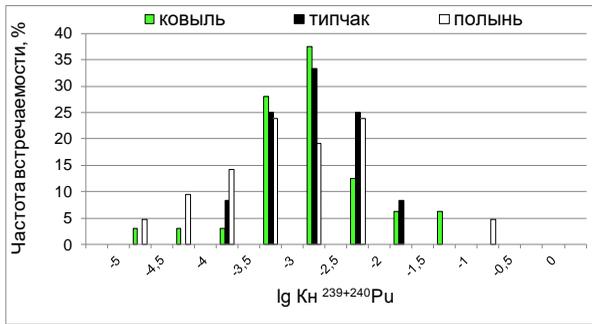
Рисунок 2 – Средние значения K_n ^{137}Cs и ^{90}Sr для каждого из исследуемых эпицентров (для ковыля (*Stipa capillata*))

Явное смещение значений K_n в сторону больших величин отмечается для радионуклида ^{90}Sr на 8-м, 10-м и 11-м эпицентрах и ^{137}Cs – на 10-м эпицентре. Данное обстоятельство, по всей видимости, связано с биологической доступностью радионуклидов, обусловленной различиями в характеристиках проведенных испытаний.

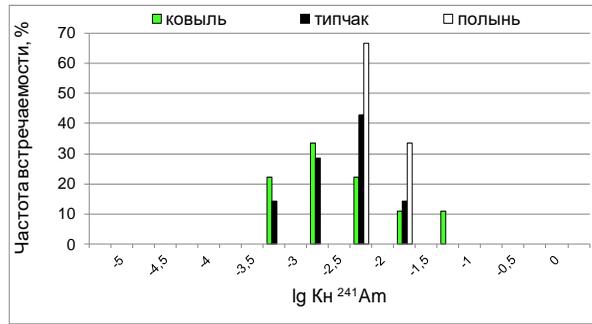
Распределение K_n здесь и далее представлено в виде гистограмм частоты встречаемости $\lg K_n$ данных радионуклидов. На рис. 3 представлено распределение ^{241}Am и $^{239+240}\text{Pu}$ между различными видами растений (ковыль (*Stipa capillata*), типчак (*Festuca valesiaca*), полынь (*Artemisia sublessingiana*)) в эпицентрах проведения наземных испытаний и между ними.



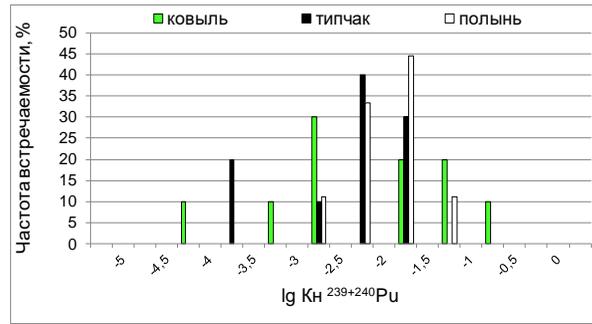
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3 – Распределение значений lg Kn ²⁴¹Am и ²³⁹⁺²⁴⁰Pu для исследуемых видов растений в эпицентрах (а, б) и между ними (в, г)

В целом Кн ^{241}Am и $^{239+240}\text{Pu}$ для участков, расположенных в зонах ближних выпадений, сдвинуты в сторону больших величин. Наибольший диапазон Кн в эпицентрах проведения наземных испытаний отмечается для полыни (*Artemisia sublessingiana*), в зонах ближних выпадений – для ковыля (*Stipa capillata*). Видовые особенности растений обуславливают различия в накоплении ^{137}Cs от 2 до 4 раз, ^{241}Am – от 2 до 5 раз, ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ – в 3 раза.

Для того, чтобы в целом рассмотреть особенности накопления радионуклидов степными растениями в местах проведения наземных ядерных испытаний на «Опытном поле» проведем обобщение всех полученных данных. Как видно из табл. 2, параметры накопления радионуклидов для исследуемой территории характеризуются большими диапазонами Кн, которые для ^{137}Cs составляют 2 порядка, для ^{90}Sr – 3 порядка, а для радионуклидов трансуранового ряда (^{241}Am и $^{239+240}\text{Pu}$) достигают 4 порядков.

Таблица 2 - Статистические показатели Кн ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am и $^{239+240}\text{Pu}$ для растений степных экосистем на площадке «Опытное поле»

Радионуклиды	n	min – max	GM	GSD	AM	SD
<i>эпицентры</i>						
^{137}Cs	72	0,00023 – 0,07	0,0028	3,6	0,0061	0,01
^{90}Sr	67	0,002 – 1,1	0,023	3,6	0,065	0,16
^{241}Am	73	0,000004 – 0,064	0,00052	3,8	0,0019	0,0075
$^{239+240}\text{Pu}$	66	0,000011 – 0,13	0,0014	5,6	0,0060	0,018
<i>участки между эпицентрами</i>						
^{137}Cs	30	0,0029 – 0,30	0,020	3,1	0,042	0,068
^{90}Sr	24	0,0038 – 0,18	0,026	2,7	0,040	0,041
^{241}Am	23	0,00050 – 0,42	0,0056	4,2	0,025	0,086
$^{239+240}\text{Pu}$	29	0,000090 – 0,27	0,0068	6,6	0,024	0,051
n – число случаев; GM – ср. геом. (GSD – станд. откл.), AM – ср. ариф. (SD – станд. откл.)						

Несмотря на высокую вариабельность, значимая разница в накоплении радионуклидов наблюдалась для отдельных участков площадки «Опытное поле» — сравнительно более низкие значения Кн ^{137}Cs , а также ^{241}Am и $^{239+240}\text{Pu}$ отмечаются в эпицентрах проведения наземных испытаний, тогда как более высокие в зонах ближних выпадений. Более равномерное накопление наблюдается для ^{90}Sr , что может быть связано с его большей подвижностью в системе «почва-растение». Однако, исходя из полученных данных, в целом на территории «Опытного поля» можно выделить 2 территории с принципиально разными типами радиоактивного загрязнения: эпицентры непосредственного проведения наземных испытаний и участки так называемых «следов» ближних выпадений, расположенных между ними.

«Атомное» озеро

Интересные данные распределения Кн ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ получены вдоль «следа» радиоактивных выпадений по мере удаления от эпицентра наземного экскавационного испытания — «Атомного» озера (рис. 4).

Полученные данные показывают, что Кн ^{137}Cs в 3-4 раза, а ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ в 2 раза выше для полыни (*Artemisia gracileccens*), чем для ковыля (*Stipa sareptana*). Однако для обоих исследуемых видов растений отмечается явное повышение Кн ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ по мере удаления от гребня воронки «Атомного» озера. Полученные Кн в данном случае могут быть обусловлены характером радиоактивного загрязнения исследуемой территории, в том числе потенциальной биологической доступностью радионуклидов в почвах, которая в заложенном профиле в определенной степени может зависеть от растворимости выпавших продуктов взрыва [3]. При этом химические формы нахождения радионуклидов, в том числе их растворимость, будут зависеть от размеров выпадающих частиц и соответственно от расстояния точки от эпицентра взрыва. Так, минимальные значения Кн ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ наблюдаются в районе «навала» — до 500 м от гребня, образовавшегося в результате проведения ядерного испытания, а максимальные — на расстоянии более 2000 м по профилю [7].

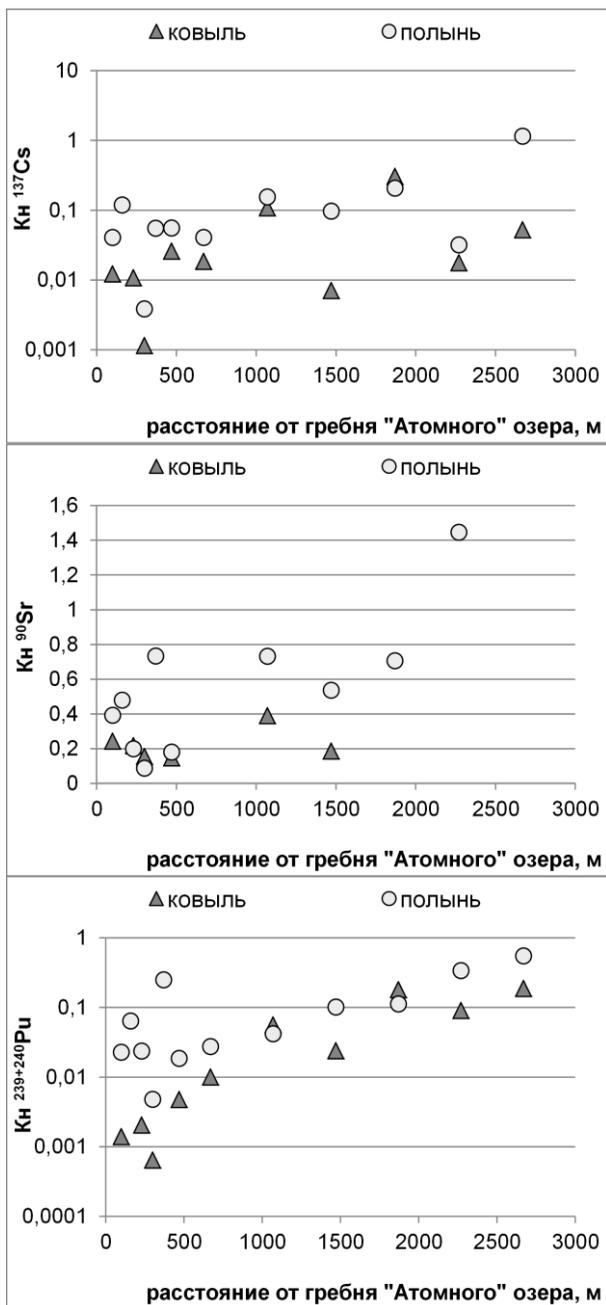


Рисунок 4 – Распределение K_n^{137Cs} , 90Sr и $^{239+240Pu}$ растениями по мере удаления от гребня воронки «Атомного» озера

«След» от взрыва 1953 года

Подобного рода картина установлена и в зоне «следа» от взрыва 1953 г., произведенного на площадке П-1. Распределение Кн ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am для степного разнотравья в зависимости от расстояния по оси «следа» от эпицентра взрыва показано на рис. 5.

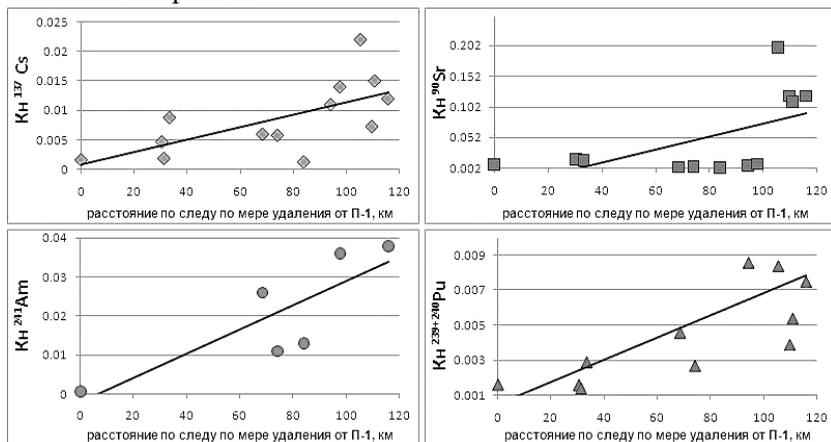


Рисунок 5 – Распределение значений Кн ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am по оси «следа» по мере удаления от эпицентра взрыва

Так, по мере удаления по «следу» от эпицентра проведения испытания также отмечается увеличение Кн ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am , что, как и в районе «Атомного» озера, по всей видимости говорит о повышении биологической доступности радионуклидов в почвах. Минимальные значения Кн наблюдаются в районе непосредственного эпицентра проведения наземного испытания, а максимальные – на расстоянии более 100 км по «следу» от него [9].

Условно «фоновые» территории

Далее увеличение Кн ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ отмечается на условно «фоновых» территориях – «северной», «западной» и «юго-восточной» частей СИП (табл. 3).

Таблица 3 - Статистические показатели Кн ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ для степного разнотравья условно «фоновых» территорий

Радионуклиды	n	min – max	GM	GSD	AM	SD
<i>«северная» часть СИП</i>						
^{137}Cs	15	0,003 – 0,056	0,014	2,6	0,020	0,016
^{90}Sr	1	–	–	–	–	–
$^{239+240}\text{Pu}$	9	0,012 – 0,095	0,024	2,1	0,033	0,031
<i>«западная» часть СИП</i>						
^{137}Cs	12	0,01 – 0,15	0,034	2,6	0,052	0,050
^{90}Sr	3	0,15 – 1,73	0,530	3,4	0,810	0,820
$^{239+240}\text{Pu}$	13	0,002 – 0,21	0,018	4,1	0,042	0,060
<i>«юго-восточная» часть СИП</i>						
^{137}Cs	13	0,012 – 0,3	0,063	2,8	0,100	0,100
^{90}Sr	14	0,0079 – 0,84	0,220	4,2	0,390	0,290
$^{239+240}\text{Pu}$	11	0,00075 – 0,11	0,018	3,6	0,031	0,031
<p>n – число случаев; GM – среднее геометрическое, GSD – стандартное отклонение от среднего геометрического, AM – среднее арифметическое, SD – стандартное отклонение среднего арифметического</p>						

Параметры накопления радионуклидов растениями на перечисленных условно «фоновых» территориях СИП изменяются в широких пределах. Диапазон значений Кн ^{137}Cs варьирует до 2 порядков, ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ достигает 3 порядков. В наибольшей степени в растениях накапливается радионуклид ^{90}Sr , в наименьшей степени – $^{239+240}\text{Pu}$ [9].

Места испытания боевых радиоактивных веществ (БРВ)

Нехарактерное поведение искусственных радионуклидов в системе «почва-растение» отмечается в местах испытания боевых радиоактивных веществ (БРВ). Накопление ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ растениями здесь изменяется в следующем ряду убывания: $^{90}\text{Sr} > ^{239+240}\text{Pu} > ^{137}\text{Cs}$. Полученные Кн ^{90}Sr (0,15 до 6,3) до двух

порядков выше, чем имеющиеся количественные значения Кн ^{137}Cs (0,025 до 0,052). Диапазон значений Кн ^{90}Sr составляет один порядок, причём большинство величин превышает единицу. Особый интерес представляют Кн $^{239+240}\text{Pu}$ (0,015-3,8), которые выше Кн ^{137}Cs , что абсолютно нехарактерно для данного радионуклида.

Подобное накопление радионуклида ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ на исследуемой территории, по всей видимости, может быть связано с формой их поступления в окружающую среду при испытаниях БРВ. Значения Кн ^{137}Cs в местах испытаний БРВ количественно сравнимы с Кн ^{137}Cs , полученными ранее для условно «фоновых» территорий СИП, что говорит об одинаковом характере загрязнения этих территорий по данному радионуклиду.

На рис. 6 представлено сравнительное распределение полученных Кн ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ для различных видов растений (ковыль (*Stipa capillata*), типчак (*Festuca valesiaca*), полынь (*Artemisia sublesingiana*)).

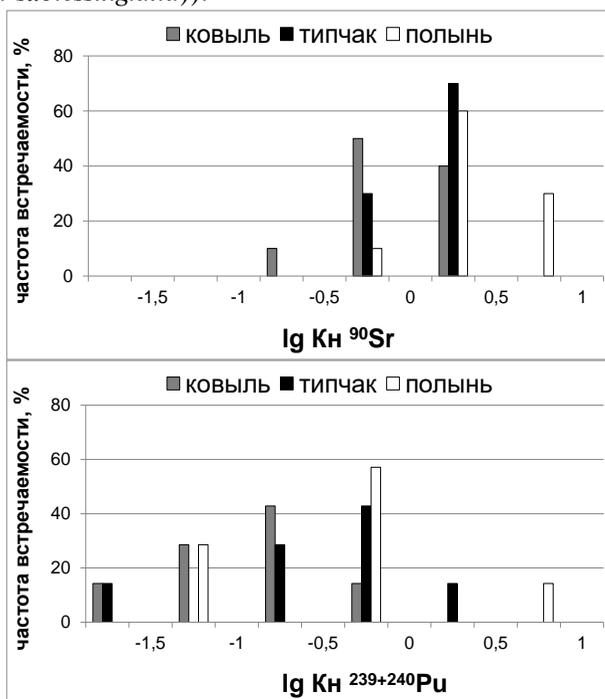


Рисунок 6 – Распределение значений $\lg \text{Kn } ^{90}\text{Sr}$ и $^{239+240}\text{Pu}$

Различия в распределении значений накопления ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ для отдельных видов растений образуют следующий ряд по убыванию Кн: полынь > типчак > ковыль. Кн для полыни в среднем в 2-3 раза выше, чем для ковыля и типчака [9].

Площадка «Дегелен»

Особенности накопления ^{137}Cs и ^{90}Sr растениями луговых ценозов (пижма (*Tanacetum vulgare*), шиповник (*Rosa spinosissima*), волоснец (*Leymus angustus*), иван-чай (*Chamaenerium angustifolium*), бодяк (*Cirsium arvense*)) рассмотрено на площадке «Дегелен» в районе штолен № 176 и № 177 (рис. 7).

Различия в распределении значений Кн видны как для отдельных видов растений, так и для разных радионуклидов, причем более резко выражены для ^{137}Cs , чем для ^{90}Sr . Так, в районе штольни № 176 для волоснеца диапазон значений Кн ^{137}Cs меньше (2 порядка), чем для пижмы и шиповника (по 3 порядка), а в районе штольни № 177 диапазон значений Кн ^{137}Cs меньше для пижмы (1 порядок), чем для бодяка (2 порядка) и иван-чая (3 порядка). Средние же значения Кн ^{90}Sr , в отличие от ^{137}Cs , в целом смещены в сторону больших величин, следовательно, в большей степени в растениях накапливается именно ^{90}Sr . Определенное исключение составляют данные для пижмы в районе штольни № 177, средние Кн ^{90}Sr которой не превышают единицы. Также необходимо отметить, что определенный сдвиг Кн ^{137}Cs в сторону меньших величин прослеживается для всех исследуемых растений в районе штольни № 177, что связано с различиями в физико-химических свойствах почв данной территории [9]. Видовые особенности растений обуславливают различия в накоплении ^{137}Cs от 2 до 10 раз, ^{90}Sr — от 2 до 6 раз, $^{239+240}\text{Pu}$ — в 2 раза.

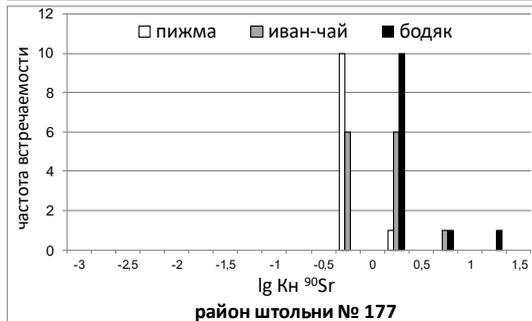
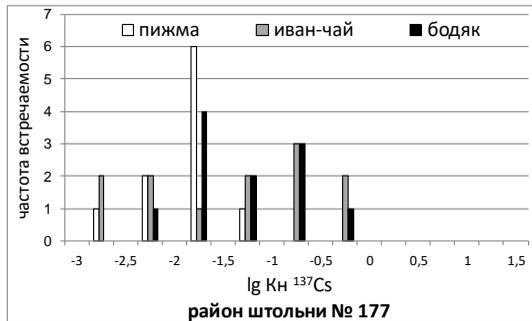
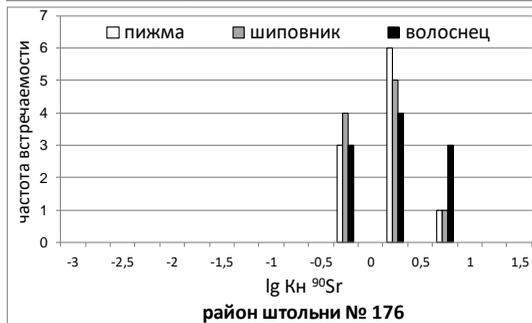
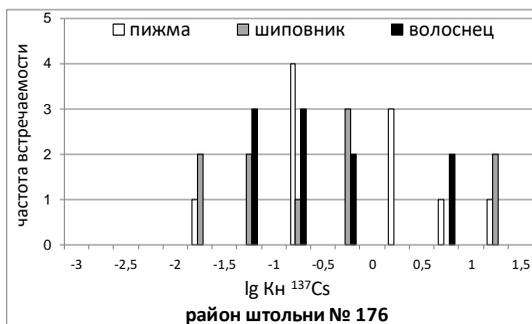


Рисунок 7 – Распределение значений $\lg K_n^{137Cs}$ и ^{90}Sr районе штолен № 176 и № 177 на площадке «Дегелен»

Обобщенные статистические показатели Кн ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ для луговых экосистем в районе водотоков штолен на площадке «Дегелен» представлены в табл. 4.

Таблица 4 - Статистические показатели Кн ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ для растений луговых экосистем в районе радиоактивных водотоков штолен на площадке «Дегелен»

Радионуклиды	n	min – max	GM	GSD	AM	SD
^{137}Cs	134	0,0014 – 16	0,20	7,3	1,07	2,4
^{90}Sr	137	0,10 – 29	1,7	2,1	2,3	2,8
$^{239+240}\text{Pu}$	32	0,00016 – 0,13	0,0059	5,9	0,021	0,034
n – число случаев; GM – ср. геом. (GSD – станд. откл.), AM – ср. ариф. (SD – станд. откл.)						

Как видно из табл. 4, параметры накопления ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ для исследуемой территории характеризуются большими диапазонами Кн данных радионуклидов. Прежде всего, это может быть обусловлено состоянием самих радионуклидов, формы нахождения которых напрямую зависят от характера их поступления в экосистему водотоков штолен и их дальнейшего взаимодействия со всеми ее компонентами. Учитывая постоянный вынос водорастворимых форм радионуклидов водотоками из штолен, на исследуемой территории имеют место два механизма поступления радионуклидов в растения лугового биогеоценоза: из почвы и из раствора. Накопление всех исследуемых радионуклидов изменяется в следующем ряду убывания: Кн ^{90}Sr > Кн ^{137}Cs > Кн $^{239+240}\text{Pu}$ [9].

В районе штолен № 176 и № 177 на площадки «Дегелен» также проведено изучение содержания ^3H в растительном покрове [8]. Для определения содержания ^3H отбирались смешанные пробы растений, представленные в зависимости от характера рельефа и уровня увлажнения каждой точки основными составляющими луговых и степных сообществ, а также степных сообществ с элементами петрофитной растительности.

Удельная активность ^3H в отобранных пробах растений в районе штольни № 176 достигает $2,2 \cdot 10^5$ Бк/кг. Максимальные значения отмечаются в точках, расположенных до 5 м по обеим

сторонам от водотока. По мере удаления от русла содержание ^3H в пробах растений закономерно постепенно снижается.

Распределение радионуклида ^3H в растениях вдоль по руслу водотока штольни № 177 представлено на графике (рис. 6).

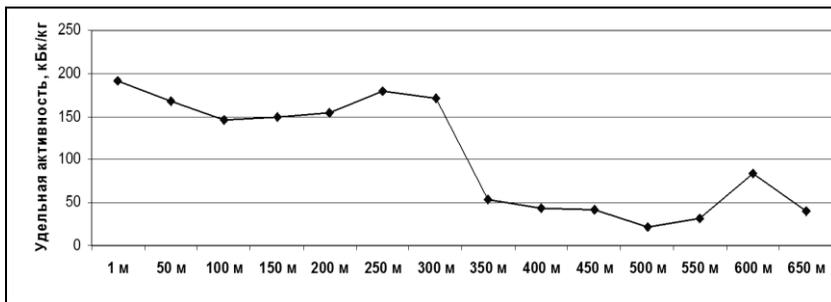


Рисунок 8 – Распределение значений удельной активности ^3H в свободной воде растений вдоль русла водотока штольни № 177

Максимальная удельная активность ^3H в растениях вдоль русла водотока штольни № 177 не превышает $1,9 \cdot 10^5$ Бк/кг. Увеличение удельной активности ^3H на расстоянии 250 м от навала, видимо, указывает на наличие дополнительного источника поступления ^3H с грунтовыми водами, причем с более высокой концентрацией данного радионуклида. Резкое понижение удельной активности ^3H отмечается на расстоянии 350 м от навала и территориально совпадает с участком конечного стока весенних вод, характеризующимся сменой луговой растительности на лугово-степную. Далее по течению водотока содержание ^3H в растениях постепенно снижается (до $2,4 \cdot 10^4$) Бк/кг. Некоторое повышение концентрации ^3H в растительности ($8,3 \cdot 10^4$ Бк/кг) наблюдается лишь в зоне общего конечного стока в р. Узынбулак.

До недавнего времени считалось, что радиоактивное загрязнение объектов окружающей среды на площадке «Дегелен» сосредоточено в руслах водотоков штолен и ручьев, связанных с ними гидрологически, однако последние исследования показали, что существует вынос радионуклидов и за ее периметр [17]. Основными путями миграции здесь являются ручьи Узынбулак, Байтлес, Токтакушук, Карабулак и несколько ручьев без названия. Как правило, это сезонные водотоки, зависящие от уровня осадков и большую часть времени летнего сезона находящиеся в пересохшем состоянии. Таким образом, можно

предположить, что наибольший вклад в загрязнение территории за границей площадки «Дегелен» дают грунтовые воды, которые согласно гидрогеологическим картам местности протекают на небольшой глубине, порядка 2-5 м, вдоль сухих русел основных ручьев. Достоверно известно, что основное загрязнение здесь приходится на радионуклид ^3H , концентрации которого в грунтовых и поверхностных водах достигают десятков кБк/кг. На рис. 9 показано пространственное распределение ^3H в растительном покрове на границе площадки «Дегелен» и в зоне влияния основных ручьев, выходящих за ее пределы [12].

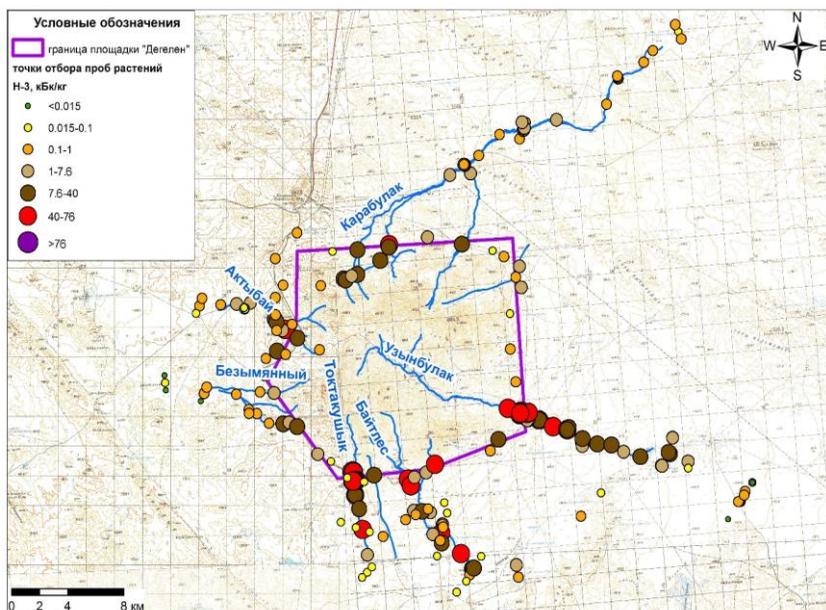


Рисунок 9 – Карта-схема распределения ^3H в растительном покрове (по данным удельной активности ^3H в свободной воде растений)

Представленная карта-схема наглядно показывают, что зоны выхода ^3H за границы площадки «Дегелен» в большинстве случаев территориально приурочены к зонам расположения основных ручьев, берущих своё начало на территории горного массива и выходящие далеко за ее пределы. Это ручьи Узынбулак, Байтлес, Токтакушык, левый приток ручья Безымянный и Актыбай, ручей Карабулак, а также небольшой сток вод, расположенный на восточной границе площадки, которые собственно и являются основным источником

поступления ^3H в объекты окружающей среды на данной территории. При этом основное загрязнение ^3H растительного покрова исследуемой территории приурочено к руслам ручьев Узынбулак, Байтлес и Токтакушык.

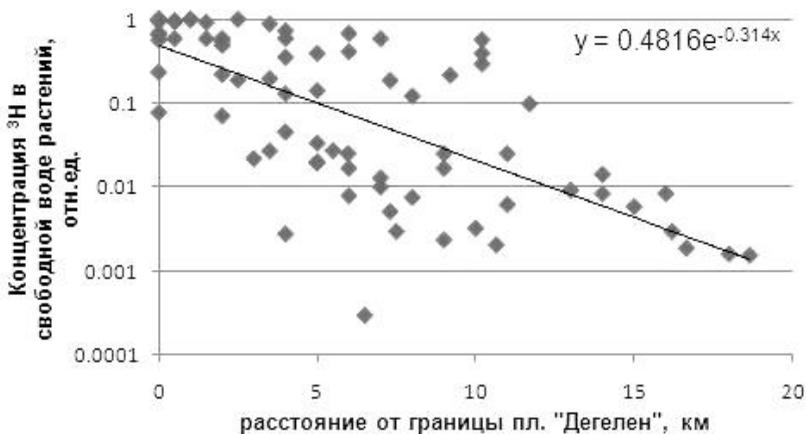
Содержание ^3H в свободной воде исследуемых растений изменяется от $n\text{Ч}10^1$ Бк/кг до 85 кБк/кг, зачастую превышая уровень вмешательства при поступлении данного радионуклида с водой, который, согласно нормативным документам (приложение 3 ГН СЭТОРБ РК), составляет 7,6 кБк/кг.

Изменение удельной активности ^3H в свободной воде растений вдоль русел основных ручьев в целом происходит по экспоненциальному закону – с увеличением расстояния от границы площадки «Дегелен» концентрация ^3H снижается (рис. 10, а).

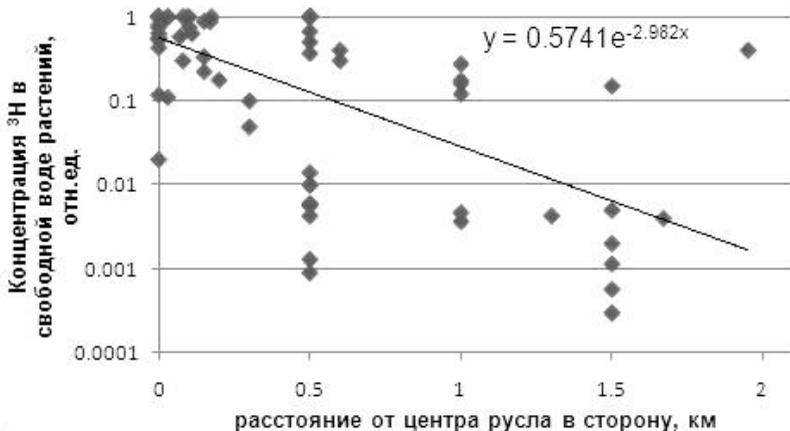
Однако повышенные концентрации ^3H распространяются на достаточно большие расстояния от площадки «Дегелен». Высокие значения удельной активности ^3H в свободной воде растений по руслам встречаются на расстоянии до 10 км. Минимальные концентрации ^3H отмечены в зонах конечного стока каждого из ручьев и составляют десятки Бк/кг в свободной воде растений.

Более сложный характер распределения ^3H отмечается по мере удаления в сторону от русел основных ручьев (рис. 10, б). Хотя в целом здесь также отмечается снижение концентрации ^3H в свободной воде растений по мере удаления в сторону от центра русел, в отдельных случаях картина имеет прямо противоположный вид – в центре отмечается минимум.

Столь неоднозначное распределение ^3H в растительном покрове может быть связано с видовым составом растений исследуемой территории. Если в русле в основном произрастают гидрофиты, питающиеся за счет поверхностных и приповерхностных вод, то на некотором удалении от него представители фреатофитов в качестве источника влаги могут использовать грунтовые, так называемые поровые, воды. И если концентрация ^3H в данных источниках будет различна, то и в свободной воде растений будут фиксироваться соответствующие значения удельной активности данного радионуклида.



а



б

Рисунок 10 – Характер распределения ^3H в растительном покрове по мере удаления от площадки «Дегелен» (а) и по мере удаления в сторону от русел основных ручьев (б)

Другим фактором, объясняющим данную ситуацию, может служить сам характер распространения подземных вод, не имеющий четкой привязки к руслу поверхностного водотока. В этом случае сравнительно высокие концентрации ^3H могут отмечаться в растениях на значительном расстоянии от центра русла (в нашем случае – до 2 км), что говорит о широте потока, загрязненных ^3H грунтовых вод.

Река Шаган

Высокие концентрации радионуклида ^3H в грунтовых водах выявлены и на других участках СИП. Одним из таких неблагополучных участков является зона русла реки Шаган. Основная проблема данного объекта заключается в высоких концентрациях радионуклида ^3H в компонентах природной среды, наиболее вероятно поступающих, в подземные и поверхностные воды реки Шаган из района «боевых» скважин площадки «Балапан» в 4-5 км от «Атомного» озера [1]. Многочисленные исследования показали, что удельная активность ^3H в грунтовых, в частности в поровых водах (глубина залегания 3-7 м), в районе русла реки Шаган достигает $7\text{Ч}10^5$ Бк/кг [2].

На основании обобщения данных, полученных с 2007 по 2012 гг. получены средние, минимальные и максимальные значения удельной активности ^3H в свободной воде растений вдоль русла реки Шаган на различном удалении от «Атомного» озера (рис. 11) [10].

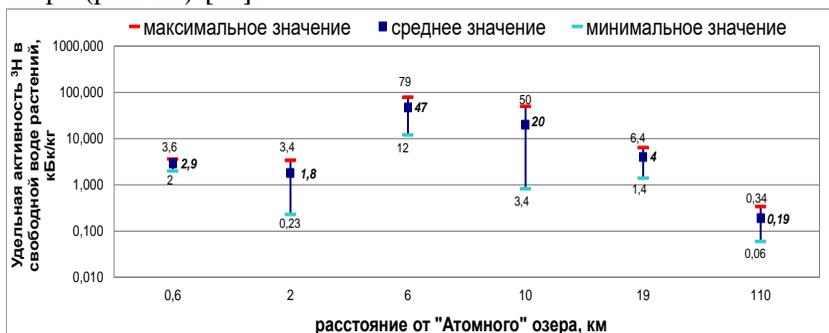


Рисунок 11 – Удельная активность ^3H в свободной воде растений

Из рис. 11 видно, что значения удельной активности ^3H в свободной воде растений сильно варьируют на протяжении всего русла реки Шаган – от 0,06 до 79 кБк/кг. При этом уровень вмешательства при поступлении данного радионуклида с водой, согласно приложению 3 ГН СЭТОРБ РК, составляет 7,6 кБк/кг. Максимальные концентрации ^3H отмечаются в районе 5-6 км, что в целом согласуется с результатами по содержанию ^3H в воде данного участка [1]. Количественные данные удельной активности ^3H установлены в точке «мост», расположенной в непосредственной близости к реке Иртыш.

Для оценки постоянного содержания ^3H в растительном покрове русла реки Шаган в различные периоды времени проведен сравнительный анализ данных удельной активности ^3H в отдельных видах растений (тростник (*Phragmites australis*), волоснец (*Leymus angustus*), чий (*Achnaterum splendens*)), отобранных в 3 точках в течение трех лет (2007, 2008, 2012) (рис. 12).

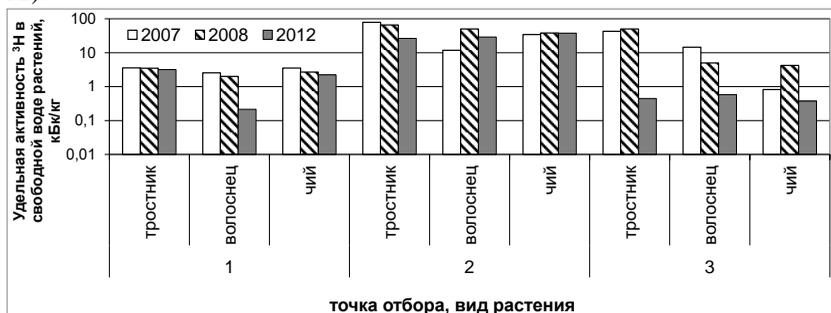


Рисунок 12 – Содержание ^3H в свободной воде растений в разные годы

Можно отметить, что содержание ^3H в растительном покрове в русле реки Шаган нестабильно. Так, в 2012 г. наблюдается определенное снижение концентраций ^3H в свободной воде изучаемых видов растений по сравнению с 2007 и 2008 гг. Подобные изменения концентраций ^3H в растениях в разные годы могут быть связаны с изменениями его содержания в основных источниках загрязнения – поверхностных, подрусловых и грунтовых водах в этот период.

Заключение

Впервые для территории СИП получена целостная картина параметров накопления ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am , $^{239+240}\text{Pu}$ из почвы растениями (рис. 13). В среднем минимальное накопление всех рассмотренных радионуклидов установлено на «Опытном поле», далее увеличивается по «следам» радиоактивных выпадений и на условно «фоновых» территориях. Наибольшие значения коэффициентов накопления характерны для зон радиоактивных водотоков и мест испытания БРВ. Различия в Кн для ^{137}Cs достигают 71 раза, ^{90}Sr – 74 раз, $^{239+240}\text{Pu}$ – 14 раз, ^{241}Am – 11 раз. Тем не менее, ряд убывания радионуклидов по их способности к накоплению растениями имеет следующий вид: Кн ^{90}Sr > Кн ^{137}Cs > Кн $^{239+240}\text{Pu}$ > Кн ^{241}Am . Кн ^{90}Sr в среднем в 8 раз

превышают Кн ^{137}Cs и до 16 раз Кн $^{239+240}\text{Pu}$. Значения Кн $^{239+240}\text{Pu}$ до 3 раз выше Кн ^{241}Am . Исключение составляют места испытания БРВ, где накопление исследуемых радионуклидов растениями изменяется в следующем ряду убывания: $^{90}\text{Sr} > ^{239+240}\text{Pu} > ^{137}\text{Cs}$.

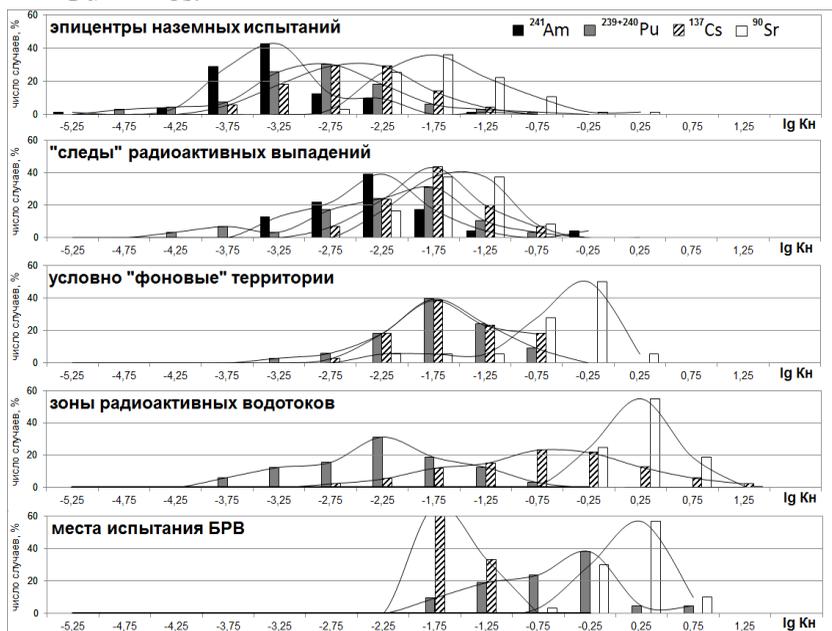


Рисунок 13 – Распределение значений $\lg \text{Kn}$ ^{241}Am , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{137}Cs и ^{90}Sr для исследуемых территорий СИП

Впервые для территории СИП установлено содержание радионуклида ^3H в свободной воде растений. Максимальные концентрации ^3H (до 200 кБк/кг) выявлены в зонах радиоактивных водотоков штолен на площадке «Дегелен», повышенное содержание ^3H в растительном покрове приурочено к зонам выхода и влияния русел основных ручьев за ее пределами. Высокие удельные активности ^3H в свободной воде растений также отмечены в русле реки Шаган, и сильно варьируют на всем ее протяжении – от 0,06 кБк/кг до 79 кБк/кг. Особое значение сложившейся ситуации придает возможность миграции ^3H с грунтовыми водами за пределы СИП, в связи с чем проблема приобретает региональный характер.

Все приведенные исследования по изучению искусственных радионуклидов в растительном покрове проводились на

территории СИП в естественных природно-климатических условиях. Однако полученные результаты дали лишь необходимое базовое понимание этого вопроса, но не позволили получить стабильных данных, например, о переходе радионуклидов из почвы в растения (высокая вариабельность величин параметров перехода, достигавшая 1-4 порядков), в силу влияния многофакторности окружающей среды. Логическим продолжением проведенных работ является постановка модельных опытов в условиях с заданными контролируруемыми параметрами.

Совокупность натуральных и экспериментальных исследований позволит выявить приоритетные механизмы поступления различных радионуклидов в растения, дать их количественную оценку и, соответственно, прогнозировать наиболее значимые пути миграции для различных радионуклидов в природных условиях.

Благодарности

Авторы выражают глубокую благодарность коллегам из Института ядерной физики (г. Алматы) за проведение радионуклидного анализа и коллективу Института радиационной безопасности и экологии за всестороннюю помощь в постановке всех исследований.

Список литературы

1. Айдарханов А.О., Лукашенко С.Н. и др. Состояние экосистемы р. Шаган и основные механизмы его формирования / Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана [Сборник трудов Института радиационной безопасности и экологии за 2007-2009 гг.] / под рук. Лукашенко С.Н. – Вып. 2. – Павлодар: Дом печати, 2010. – С. 9-55: ил.- Библиогр.: с. 528. - ISBN 978-601-7112-28-8.
2. Есимбеков А.Ж., Айдарханов А.О. и др. Определение и локализация каналов поступления ^3H в воды реки Шаган / Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана [Сборник трудов Национального ядерного центра Республики Казахстан за 2011-2012 г.], под ред. С.Н. Лукашенко – Павлодар: Дом печати, 2013. – Вып.4. – Т.2 – С.105-112
3. Израэль Ю.А., Петров В.Н., Прессман А.Я., Ровинский Ф.Я. Радиоактивное загрязнение природных сред при подземных ядерных взрывах и методы его прогнозирования / под ред. Ю.А. Израэля. – Ленинград: Гидрометеорологическое издательство, 1970. – С. 41-42.
4. Инновационный патент № 29721 на изобретение «Устройство для извлечения воды из образцов», 17.03.2015г.

5. Кадырова Н.Ж. Распределение техногенных радионуклидов в экосистемах «почва-растение» различных ландшафтов территории СИП / Н.Ж. Кадырова, А.А. Мельничук // Семипалатинский испытательный полигон. Радиационное наследие и проблемы нераспространения: материалы II междунар. научно-практической конф., 6-8 сентября 2005 г. – Курчатова: ИРБЭ НЯЦ РК, 2005. – Т. 2. – С. 193-198.
6. Кайрамбаев С.К. Миграция радионуклидов в системе «почва-растение» на территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона: Автореф. Дис. ... канд. биол. наук / С.К. Кайрамбаев. – Курчатова, 2006. – 22 с.
7. Ларионова Н.В., Айдарханова А.К., Айдарханов А.О., Лукашенко С.Н. Радиоактивное загрязнение растений в местах проведения экскавационных ядерных взрывов на Семипалатинском испытательном полигоне / Материалы V юбилейной Международной конференции «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека», 13-16 сентября 2016 г., г. Томск, 389-390 с.
8. Ларионова Н.В. Исследование возможности использования растений в качестве показателей содержания ^3H в грунтовых водах / Ларионова Н.В., Лукашенко С.Н., Субботин С.Б. [и др.]. // Вестник НЯЦ РК: периодический научно-технический журнал. - Курчатова, 2009. - Вып. 2. – С.18 -25.
9. Ларионова Н.В. Накопление искусственных радионуклидов растениями на территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона: Автореф. Дис. ... канд. биол. наук / Н.В. Ларионова. – Обнинск, 2013. – 22 с.
10. Ларионова Н.В. Содержание трития в растительном покрове в зоне влияния реки Шаган / Н.В. Ларионова, С.Н. Лукашенко, О.Н. Ляхова, А.О. Айдарханов, А.Б. Янкаускас // Вестник НЯЦ РК, выпуск 4, декабрь 2013, С.28-31
11. Лукашенко С.Н. Радиоэкологическое обоснование возвращения территорий Семипалатинского испытательного полигона в хозяйственное использование: фундаментальные и прикладные аспекты: Автореф. Дис. ... док. биол. наук / С.Н. Лукашенко. – Обнинск, 2016. – 48 с.
12. Ляхова О.Н. К вопросу о путях миграции трития за пределы бывшей испытательной площадки «Дегелен» / О.Н. Ляхова, Н.В. Ларионова, С.Н. Лукашенко, А.О. Айдарханов, Е.В. Спирин // Бюллетень Радиация и риск. – 2014. - № 1 – С. 97-105.
13. Методика измерения активности радионуклидов с использованием сцинтилляционного бета-спектрометра с программным обеспечением «Прогресс». Менделеево, 2004. 20 с. Гигиенические нормативы «Санитарно-эпидемиологические требования к обеспечению радиационной безопасности» Утверждены постановлением Правительства Республики Казахстан № 201от 03.02.2012 года.

14. Методика определения изотопов плутония-(239+240), стронция-90, америция-241 в объектах окружающей среды: МИ 06-7-98. – Алматы, 1998.
15. МИ 5.06.001.98 РК «Активность радионуклидов в объемных образцах. Методика выполнения измерений на гамма-спектрометре МИ 2143-91» - 18 с.
16. Мукушева М.К. Радиоэкологическая обстановка и миграция радионуклидов в системе почва-растение на территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона / М.К. Мукушева, Ж.С. Такибаев, М.С. Панин // Сибирский экологический журнал. – 2003. - № 2. – С. 145-154.
17. Субботин С.Б., Лукашенко С.Н. и др. Подземная миграция искусственных радионуклидов за пределы горного массива Дегелен / Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана [Сборник трудов Института радиационной безопасности и экологии за 2007-2009 гг.] / под рук. Лукашенко С.Н. – Вып. 2. – Павлодар: Дом печати, 2010. – С. 103-156: ил.- Библиогр.: с. 528. - ISBN 978-601-7112-28-8.
18. Тулеубаев Б.А. Особенности миграции радионуклидов в почвенно-растительном покрове разных ландшафтов бывшего Семипалатинского испытательного полигона / Б.А. Тулеубаев, А.В. Паницкий // Биологические науки Казахстана. – 2004. - № 1-2. – С. 60-65.
19. ISO 9698-2010 (E) Качество воды – определение активности трития, соответствующей данной концентрации – жидкостной метод сцинтилляционного счета.

**О МОЛОДЕЖНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ С
МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ «ВЗГЛЯД МОЛОДЫХ
УЧЁНЫХ НА СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ
РАДИОБИОЛОГИИ, РАДИОЭКОЛОГИИ И
РАДИАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ», ПОСВЯЩЁННОЙ 45-
ЛЕТИЮ ОБРАЗОВАНИЯ ФГБНУ ВНИИРАЭ**

Шубина О.А., Панов А.В.

*ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт
радиологии и агроэкологии»
г. Обнинск, Россия*

В сентябре 2016 г. исполнилось 45 лет с момента основания Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии» (ФГБНУ ВНИИРАЭ).

Институт является единственным в стране центром фундаментальных и прикладных исследований по обеспечению устойчивого развития сельскохозяйственного производства и экологической безопасности производимой продукции и сырья в условиях техногенного воздействия на агросферу, включая разработку научных основ и практических приемов и технологий ликвидации последствий радиационных, химических и других техногенных аварий и инцидентов.

Институт проводит фундаментальные и прикладные исследования по оценке действия ионизирующего и неионизирующего (УФ, СВЧ) излучения на биологические объекты, изучению закономерностей миграции радионуклидов, разработке математических моделей, баз данных и систем поддержки принятия решений по реабилитации техногенно загрязненных территорий.

Фундаментальные исследования являются основой для создания практических разработок - технологий ведения различных отраслей АПК в условиях техногенного загрязнения, технологий использования УФ- и СВЧ-излучений в

сельскохозяйственной практике; разрабатываются новые комплексные удобрения пролонгированного действия и кормовые добавки для сельскохозяйственных животных на основе наноразмерных полимеров.

С 1986 года по настоящее время ВНИИРАЭ является ведущим центром по ликвидации последствий аварии на ЧАЭС в сельском хозяйстве. Созданы системы и технологии ведения сельского хозяйства в различных зонах загрязнения, системы радиационного мониторинга и контроля; разработаны защитные технологии возделывания сельскохозяйственных культур; специальные препараты и сорбенты, снижающие накопление радионуклидов в продукции животноводства, а также способы технологической переработки сельскохозяйственного сырья.

Институт активно развивает направление по фундаментальным и прикладным исследованиям и разработкам использования радиационных технологий в сельском хозяйстве, пищевой и перерабатывающей промышленности.

В ФГБНУ ВНИИРАЭ работает много молодых специалистов и 45-летие института решено было отпраздновать проведением молодежной конференции с международным участием «Взгляд молодых ученых на современные проблемы радиобиологии, радиоэкологии и радиационных технологий» (7-8 сентября 2016 г.).



В работе конференции приняли участие 63 молодых ученых из 15 научно-исследовательских институтов Российской Федерации, Республики Беларусь, Республики Казахстан, Республики Кыргызстан, Туниса, Германии. Всего конференцию посетило более 100 человек.

Формат работы конференции включал устные и стендовые доклады по следующим направлениям:

- радиационная биохимия, молекулярно-клеточная радиобиология и радиационная генетика;
- радиобиология растений и животных. Исследования ионизирующих и неионизирующих излучений;
- современные проблемы радиоэкологии: миграция радионуклидов, мониторинг радиационно-опасных объектов и

оценка рисков, проблемы реабилитации радиоактивно загрязненных территорий;

- развитие радиационных технологий в медицине, сельском хозяйстве, пищевой и перерабатывающей промышленности.

На конференции работало 3 секции: секция 1- радиобиология, секция 2 – современные проблемы радиозащиты и секция 3 – развитие радиационных технологий в медицине, сельском хозяйстве, пищевой и перерабатывающей промышленности. 36 участников выступили с устными докладами, было представлено 7 стендовых докладов. По итогам секционных заседаний и стендовой сессии ряд участников были отмечены дипломами за лучший доклад.

В заключительной части работы конференции состоялся круглый стол «Современные направления исследований и перспективы развития фундаментальных и прикладных наук». Наибольший интерес у молодых ученых вызвало обсуждение проблем интеграции, кооперации и сотрудничества, в том числе международного, как на уровне отдельных лабораторий и подразделений, так и на уровне научных организаций в целом.



Участники молодежной конференции

Научное издание

**XLV РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ЧТЕНИЯ,
ПОСВЯЩЕННЫЕ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОМУ ЧЛЕНУ ВАСХНИЛ
В.М. КЛЕЧКОВСКОМУ**

(30 ноября 2016 года, ФГБНУ ВНИИРАЭ, Обнинск)

Под редакцией
академика РАН Р.М. Алексахина

ISBN 978-5-903386-42-0



Компьютерная верстка Шубина О.А., Хохлова М.Г.

Подписано в печать 22.11.2016 г. Формат 60x90 ¹/₁₆
Усл. печ. л. 6. Тираж 350 экз. Заказ 34

Издательство ФГБНУ ВНИИРАЭ
249032, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км