На правах рукописи

Ляхова Оксана Николаевна

ИССЛЕДОВАНИЕ УРОВНЯ И ХАРАКТЕРА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТРИТИЯ В ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ НА ТЕРРИТОРИИ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА

Специальность: 03.01.01 – радиобиология

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата биологических наук

Обнинск – 2013

Диссертация выполнена в Филиале «Институт радиационной безопасности и экологии» Республиканского Государственного предприятия «Национальный ядерный центр» Республики Казахстан

Научный руководитель:
Доктор биологических наук **Спирин Евгений Викторович**

Официальные оппоненты:
Вакуловский Сергей Мстиславович, доктор технических наук, профессор, Институт проблем мониторинга ФГБУ НПО «Тайфун», главный научный сотрудник
Анисимов Вячеслав Сергеевич, кандидат биологических наук, Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной радиологии и агроэкологии, заведующий лабораторией

Ведущая организация: ФГУП «НПО "Радиевый институт им. В.Г. Хлопина"

Защита состоится 26 декабря 2013 года в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 006.068.01 при Всероссийском научно-исследовательском институте сельскохозяйственной радиологии и агроэкологии по адресу: 249032, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, ГНУ ВНИИСХРАЭ Россельхозакадемии, к. 510.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГНУ ВНИИСХРАЭ Россельхозакадемии.

Отзывы на автореферат просим отправлять по адресу: 249032, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, ГНУ ВНИИСХРАЭ Россельхозакадемии, Диссертационный совет. Факс: (48439) 6-80-66.

Автореферат разослан 25 ноября 2013 г.

Учёный секретарь диссертационного совета, кандидат биологических наук — Шубина Ольга Андреевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Во всем мире постоянно увеличивается потребность в выработке электроэнергии, в связи с чем в ближайшем будущем ожидается большой рост предприятий атомной промышленности, строительства АЭС, что повлечет за собой заметное увеличение радиоактивных отходов. На сегодняшний день важной экономической и социальной проблемой является изучение уровней содержания, путей миграции, темпов накопления и перераспределения радионуклидов в объектах окружающей среды. В этом плане рост развития атомной энергетики вызывает интерес к тритию (^{3}H), как к одному из радиоактивных нуклидов, поступающих в окружающую среду при производстве атомной энергии и относящемуся к основным дозообразующим радионуклидам.

Исследования содержания ^{3}H в последние десятилетия становятся важной частью при оценке радиоэкологического состояния природных сред. При этом внимание уделяется не только определению уровня содержания ^{3}H в различных объектах окружающей среды, но и изучению характера его распространения. Как показали многочисленные исследования, особую роль в распространении ^{3}H в природной среде играет воздушная среда. Из воздушной среды ^{3}H выпадает с радиоактивными осадками и может быть инкорпорирован во все водородосодержащие объекты – почву, воду, продукты питания, биологическую ткань животных и человека (Bogen and Welford, 1975). Тритий может перемещаться в окружающей среде, как с водными, так и с воздушными потоками (Вакуловский, Катрич, 2008, Латынова, 2009), и, например, при работе предприятий ядерной промышленности попадать напрямую в организм человека при вдыхании и через кожный покров (Баталин, 2004, Марунич, 2009).

Сегодня во всем мире проводятся многочисленные исследования, накоплен большой массив данных по уровням содержания ^{3}H в водных экосистемах (Чеботина, Николин, 2005, Болсуновский, 2011, Бондарева, 2011), в земных (Бондарева, 2003, Jean-Baptiste, 2007) и лесных (Momoshima, Kakiuchi at al., 2000) экосистемах, а также в элементах пищевой цепи (Barry, 1996, Brudnell, 1997). Ряд исследований посвящен изучению содержания ^{3}H в растительности (Boyer, 2009, Arai, Takeda, 1985, Galeriu, 2011) и в снежном покрове (Davic, 1997).

Наименее изученными с точки зрения тритиевого загрязнения являются вопросы, связанные с особенностями распространения ^{3}H в приземных слоях атмосферы. К настоящему времени хорошо изучены методы отбора проб воздуха и методы измерений активности ^{3}H в отбираемых пробах (Sannes and Banville, 1965, Overhoff, 1999) и активно проводится мониторинг концентрации ^{3}H в воздухе в районах расположения АЭС и предприятий атомной промышленности (Егоров, 2002, Парамонова, Каширин и др., 2006, Osborne, 2002, Harris, Miller, 2008). Но при работе АЭС и других предприятий ядерно-топливного цикла ^{3}H поступает в окружающую природную среду нерегулярно и быстро мигрирует из мест первичного загрязнения, поэтому единичные и несистематические измерения его не позволяют выявить реальных масштабов загрязнения воздушной среды. Отсутствие систематических данных ведет в свою очередь к затруднениям при изучении характера распределения ^{3}H в воздухе.

Исследуемая проблема весьма актуальна для территории Семипалатинского испытательного полигона (СИП). Глобальное тритиевое загрязнение воздушной среды, сформированное к настоящему времени на планете, образовалось в

значительной степени вследствие проведения испытаний ядерного и термоядерного оружия. На территории СИП в период с 1949 по 1989 год было проведено 343 подземных, 26 наземных и 91 воздушных ядерных испытания, в результате чего было сформировано обширное тритиевое загрязнение объектов окружающей среды не только территории полигона, но и за ее пределами. Исследования радиоэкологической обстановки на СИП, проводимые в течение последнего времени, показали, что одним из основных радионуклидов, содержащимся в объектах окружающей среды, является ^{3}H. Были выявлены участки с чрезвычайно высоким уровнем его содержания на некоторых участках в поверхностных и подземных водах, растительности, снежном покрове (Лукашенко и др., 2010, 2011), что могло привести к тритиевому загрязнению воздушной среды вследствие высокой миграционной способности ^{3}H между различными природными компонентами. Тритий может поступать в воздух в результате испарения с поверхности тритийсодержащей воды (Fukui, 1993, Horton, 1971, Maro, Tenailleau, 2005), а также из почвы и грунтовых вод (Kim, 2012, Davic, Galeriu, 1995, Lin, Wei, 2006). В зимний период поступление ^{3}H в атмосферу происходит с поверхности снежного покрова (Galeriu, 2010).

Учитывая вышесказанное, можно было ожидать значимых концентраций ^{3}H в воздухе на территории СИП, но до настоящего момента такие исследования не проводились. Статистические данные об уровнях содержания ^{3}H в воздушной среде отсутствовали, характер распределения ^{3}H в атмосфере в местах проведения различных ядерных испытаний не исследовался. Однако, в связи с высокой концентрацией ^{3}H в поверхностных и подземных водах, существует риск миграции ^{3}H не только с водой, но и с воздушными потоками, далеко за пределы полигона. Что в свою очередь может привести к поступлению ^{3}H в организм животных и человека с воздухом, водой и по пищевым цепям. Таким образом, контроль за радиационной обстановкой по ^{3}H на территории СИП является весьма важной частью радиологических исследований. Так как тритиевое загрязнение воздушной среды на территории полигона до настоящего момента не изучалось, необходимо знание об источниках поступления и особенностях поведения ^{3}H в воздухе в местах проведения различных ядерных испытаний. Детальное изучение уровня и характера распространения ^{3}H в воздушной среде внесет существенный вклад в понимание процессов миграции ^{3}H с воздушными потоками, что является весьма важным с точки зрения радиационной безопасности окружающей среды и населения.

Цель и задачи работы. Целью исследования являлось изучение процессов формирования тритиевого загрязнения воздушной среды на территории Семипалатинского полигона в зависимости от характеристик мест проведения ядерных испытаний.

<u>В числе основных задач</u> исследования рассматривались:

1) выявление основных источников поступления трития в воздушную среду;
2) исследование пространственных распределений тритиевого загрязнения приземного воздуха внутри и вблизи штолен подземных взрывов;
3) исследование влияния водотоков штолен и ручьев на загрязнение воздушной среды;
4) изучение особенностей выноса трития в воздух в зонах расположения скважин подземных ядерных испытаний;
5) исследование уровней загрязнения воздушной среды и почвы в местах проведения воздушных, наземных и эскавационных ядерных испытаний;
6) исследование уровней загрязнения воздуха вблизи р. Шаган;

7) оценка масштабов тритиевого загрязнения воздушной среды и изучение механизмов его формирования на территории Семипалатинского испытательного полигона.

Положения, выносимые на защиту:

1. Показано, что уровни концентрации трития в воздушной среде и характер его распространения существенно изменяются в зависимости от вида проводимых испытаний.

2. Определено, что главными источниками поступления трития в воздушную среду на территории СИП являются штольневые водотоки в местах проведения подземных ядерных испытаний в штольнях и поверхностные воды, загрязненные тритием;

3. Установлено, что в местах проведения подземных ядерных испытаний в скважинах источником поступления трития в воздух является почвенная влага; в местах проведения наземных и воздушных и экскавационных ядерных испытаний отсутствуют значимые количества трития в воздушной среде, но имеет место значительное тритиевое загрязнение почвы.

4. Выявлено, что в зависимости от источника поступления трития в воздушную среду СИП характер изменения его объемной активности в воздухе различен. При наличии протяженного источника - поверхностный водоток, ручей – объемная активность трития в воздухе уменьшается экспоненциально; в случае наличия точечного источника – устье скважины, портал штольни – распределение трития в воздухе имеет более резкий характер спада в зависимости от расстояния от источника.

Предмет и объект исследования. Основным объектом исследования является атмосферный воздух, в качестве дополнительных объектов исследования использовались вода, растительность, почвенная влага и почва в местах проведения ядерных испытаний. Предметом исследования является масштаб распространения трития в воздушной среде исследуемой территории.

Научная новизна работы. Впервые для территории СИП получены систематические количественные данные об уровне содержания ^{3}H в воздушном бассейне и его распределении на испытательных площадках. Установлено, что на территории полигона сформировались участки тритиевого загрязнения окружающей среды вблизи мест проведения испытаний ядерного оружия и связанных с ними водотоков. Оценены источники поступления ^{3}H в воздушную среду в местах проведения различных ядерных испытаний – подземных, наземных, воздушных и экскавационных взрывов. Впервые определено пространственное распределение трития в воздушной среде в зависимости от источника поступления. Оценены параметры, определяющие характер и масштаб миграции трития на основных испытательных площадках и радиационно-опасных участках СИП.

Теоретическая и практическая значимость. Полученные в ходе выполнения диссертационной работы результаты могут быть использованы для совершенствования существующей системы контроля радиационного состояния воздушной среды, более детальной проработки существующих систем мониторинга. Установленные закономерности по распределению и миграции ^{3}H в воздушной среде позволят корректно оценивать дозы облучения населения, проживающего вблизи предприятий топливного цикла и радиационно-опасных объектов, в частности на территории СИП и в прилегающих регионах. Данные об уровнях и характере тритиевого загрязнения воздушной среды на территории СИП могут использоваться

как дополнительный аналитический метод для определения мест проведения ядерных испытаний с использованием радионуклида тритий в качестве индикатора.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. В соответствии с формулой специальности 03.01.01 «Радиобиология», охватывающей проблемы последствий ядерных катастроф и радиоэкологии (п. 9), принципы и методы радиационного мониторинга (п. 10) в диссертационном исследовании представлен метод исследования тритиевого загрязнения объектов окружающей среды на территории СИП. В работе представлена оценка уровня содержания ^{3}H в воздушной среде в местах проведения ядерных испытаний различного характера, комплексно рассмотрен вопрос о возможной миграции ^{3}H за пределы испытательных площадок СИП.

Личный вклад диссертанта в работу. Соискатель лично участвовала в постановке цели и задач диссертационной работы, в создании экспериментальной базы исследования, в постановке и проведении натурных экспериментов, проведении отбора проб окружающей среды и выполнении β-спектрометрического анализа. Диссертант принимала непосредственное участие в интерпретации полученных результатов и подготовке публикаций.

Апробация работы и публикации. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих международных и региональных конференциях, конкурсах, совещаниях и конгрессах: Международная конференция «Environmental Radioactivity» (Рим, 2010); Международная научная конференция «CTBT: наука и технологии», Австрия, Вена (2011, 2013 г.г.).; V Всемирный конгресс инжиниринга и технологий – WCET-2012 «Наука и технологии: шаг в будущее» (Алматы, 2012); IV Международная научная конференция «Современные проблемы загрязнения почв» (Москва, МГУ, 2013); 8-я и 9-я Международные конференции «Ядерная и радиационная физика» (Алматы, 2011, 2013); VI-международная научно-практическая конференция «Тяжелые металлы и радионуклиды в окружающей среде» (Семей, 2010); Международная конференция молодых ученых и специалистов «Актуальные вопросы мирного использования атомной энергии» (Алматы, 2012); III-я, IV-я и V-я Международные научно-практические конференции «Семипалатинский испытательный полигон. Радиационное наследие и проблемы нераспространения» (Курчатов, 2008, 2010, 2012); Конференция-конкурс НИОКР молодых ученых и специалистов НЯЦ РК (Курчатов, 2005, 2008, 2010, 2011, 2013); VII-я Международная конференция «Мониторинг ядерных испытаний и их последствия», Институт ядерной физики, г.Курчатов (2012 г.).

Результаты исследования были включены в отчёты при выполнении работ по следующим программам: научно-техническая программа 0346 "Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан", этап 01.01.01. "Исследование экосистем, подверженных влиянию радиоактивно-загрязненных водотоков", республиканская бюджетная программа "Обеспечение радиационной безопасности на территории РК" (мероприятие 1 "Обеспечение безопасности бывшего СИП") и др.

По материалам диссертации опубликовано 19 работ, в том числе **2** статьи – в рецензируемых журналах из перечня изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 132 страницах, включает введение, 6 глав, заключение, выводы, 11 таблиц, 49 рисунков, 1 приложение и список публикаций из 128 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследования, ставятся цель и задачи, решаемые в диссертации, обсуждается их научная новизна, теоретическая и практическая значимость.

Глава 1. Литературный обзор вопроса исследований

На основе анализа отечественной и зарубежной литературы рассмотрены основные физико-химические свойства радионуклида ^{3}H, основные формы нахождения ^{3}H в природе, источники поступления искусственного и техногенного ^{3}H в окружающую среду. Отмечены уровни загрязнения ^{3}H различных природных объектов, расположенных вблизи предприятий атомной промышленности, описаны закономерности формирования тритиевого загрязнения объектов окружающей среды. Отдельная глава обзора литературы посвящена уровням концентрации ^{3}H в объектах окружающей среды в местах проведения различных ядерных испытаний на территории СИП.

ГЛАВА 2. МЕТОДЫ И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследование проводили на основных испытательных площадках СИП. Было выбрано 5 участков исследования, характеризующихся проведением разных по виду ядерных испытаний. Это площадка «Дегелен» и площадка «Балапан» - места проведения подземных ядерных испытаний в штольнях и скважинах, площадка "Опытное поле" - место проведения воздушных, наземных и приземных ядерных испытаний, территория реки Шаган - радиационно-опасный объект полигона со значительным содержанием ^{3}H в воде, «Атомное» озеро – воронка, образовавшаяся в результате проведения экскавационного взрыва на площадке "Балапан".

Основным объектом исследования был выбран атмосферный воздух. Для исследования источников поступления ^{3}H в воздушную среду и механизмов формирования тритиевого загрязнения в качестве дополнительных объектов исследования были выбраны вода, растительность, почвенный воздух и почва.

Для исследования объемной активности ^{3}H в воздухе проводился отбор проб водяных паров атмосферного, штольневого воздуха и почвенной влаги методом криогенного вымораживания. Отбор проб водяных паров атмосферного воздуха проводился открытым способом: на выбранном участке устанавливалась криогенная установка, и производилось вымораживание на высоте 50 см от поверхности земли. Почвенная влага собиралась с использованием изолирующей емкости цилиндрической формы, позволяющей изолировать поступление атмосферного воздуха в отбираемую пробу. Для отбора проб штольневого воздуха криогенную установку с изолирующей емкостью устанавливали на поверхность насыпи портала так, чтобы она ориентировочно располагалась на уровне центральной оси котловой полости штольни. Далее, отбор проб производился также как почвенная влага. Время отбора проб методом криогенного вымораживания составляло порядка 1,5-2 ч.

Отбор проб растений для определения концентрации ^{3}H и биомассы растительного покрова на участках исследования проводился методом «укосов». При этом травянистые растения срезались на высоте 1-3 см, крупнотравье – 4-6 см. Определение продуктивности растительного покрова на каждом исследуемом участке проводилось по 3-м площадках в среднем 1 $м^2$ каждая. Удельная активность ^{3}H определялась в свободной воде растений – конденсата, полученного посредством специальной установки, представляющей собой герметичную емкость для загрузки

проб растений, снабженную охлаждаемой поверхностью и емкостью для сбора влаги, испаряемой растениями.

Отбор проб почвы проводился методом "конверта", т.е. из углов и центра квадрата размером порядка 1 м^2. После предварительной подготовки пробы (просеивание, перемешивание, сушка) отбиралась навеска, порядка 1 г для процедуры автоклавного разложения, которое подразумевает полное разложении пробы с применением азотной и плавиковой кислот под давлением, с последующей нейтрализацией и дистилляцией.

Отбор проб поверхностных вод осуществлялся при помощи батометра, который погружался в воду на заданную глубину. Пробы отбирались в пластиковые емкости, которые герметично закрывались и транспортировались в лабораторию без предварительной консервации.

Определение активности ^{3}H в исследуемых пробах проводилось методом жидкосцинтилляционной спектрометрии. Непосредственно перед проведением анализа все пробы проходили стадию фильтрации для удаления механических примесей, затем отбирался аликвота объемом 3 мл и помещалась в стандартную геометрию (пластиковая виала объемом 20 мл) с добавлением сцинтилляционного коктейля в пропорции 3:15 (отношение образец – сцинтиллятор). В качестве сцинтиллирующей жидкости использовался сцинтилляционный коктейль Ultima Gold LLT (эффективность регистрации для ^{3}H в диапазоне 0-18 КэВ порядка 45-50%). Измерения проводились при помощи жидкосцинтилляционного спектрометра TriCarb 2900 TR, с относительной эффективностью регистрации для выбранного диапазона измерений не менее 60%. Область энергии для определения ^{3}H задана в интервале от 0 до 15 кэВ. Время измерения каждого образца составляло порядка 120 минут.

Чувствительность используемых методов измерений составляет порядка 12 Бк/л - при определении удельной активности ^{3}H в свободной воде, 150 Бк/кг - при определении удельной активности ^{3}H в почве методом автоклавного разложения, 0,03÷0,5 Бк/м^3 - при определении ^{3}H в воздушной среде в зависимости от условий отбора проб и объема отобранного образца.

Для проведения контроля качества в лаборатории применялась система обеспечения контроля качества результатов. Ее обязательной частью являлась поверка средств измерений, аттестация испытательного оборудования, как основного, так и вспомогательного, актуализация методик, использование аттестованных методик. Воспроизводимость результатов составляла от 10 до 50%, в зависимости от величины удельной активности ^{3}H в образце.

Полученные результаты были обработаны статистическим методами с помощью программного обеспечения Microsoft Office Excel 2007, при построении 3-D рисунков использовалась программа Surfer и Кригинг метод экстраполяции данных, уравнения регрессии строились с применением метода наименьших квадратов.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТРИТИЯ В ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ НА ТЕРРИТОРИИ ПЛОЩАДКИ «ДЕГЕЛЕН» И ЗА ЕЕ ПРЕДЕЛАМИ.

3.1. Краткая характеристика площадки «Дегелен». Площадка «Дегелен», расположенная на одноименном горном массиве, была создана в начале 60-ых годов для проведения подземных ядерных испытаний (ПЯВ). Максимальная высота вершин составляет 1080 м, площадь территории порядка 300 км^2. ПЯВ проводились в штольнях, которые представляют собой горизонтальную горную выработку со средним сечением около 9 м^2, и расстоянием вглубь - от 500 до 1000 м. Каждая

штольня оканчивалась концевым боксом в котором устанавливался подрываемый заряд. Всего на площадке «Дегелен» была сооружена 181 штольня, где произведено 209 ПЯВ. Максимальная мощность взрывов составляла 20 кТ.

Ранее было установлено, что концентрация ^{3}H в растительности, подземных и поверхностных водах, в родниках и штольневых водотоках на территории площадки изменяется в пределах от десятков до сотен тысяч Бк/л. Штольневые водотоки гидрологически связаны с основными ручьями, расположенными на площадке «Дегелен», что обуславливает вынос ^{3}H за пределы не только мест проведения испытаний, но и далеко за переделы испытательной площадки. Было установлено, что фоновая концентрация ^{3}H в атмосферном воздухе составляла не более 0,2 Бк/м^3 (Ляхова О., Лукашенко С.Н., 2007). На данном этапе работы были проведены исследования распределения ^{3}H в воздушной среде в зонах расположения штолен, на прилегающих к ним территориях – в экосистемах штольневых ручьев, и ручьев, выходящих за пределы горного массива Дегелен.

3.2. Исследование содержания трития в воздушной среде в приэпицентральных зонах ПЯВ.

Содержание ^{3}H в воздухе определяли на участках 22 штолен, где были произведены ПЯВ различного характера. Измерения объемной активности ^{3}H проводили внутри полости штолен, на их порталах и приустьевых участках, в месте расположения вертикальных геологических скважин, пробуренных в тело штольни и в надэпицентральной зоне полости ПЯВ (зоне раздробления). На рис. 1. схематически изображена штольня в горизонтальном разрезе и схема мест отбора проб.

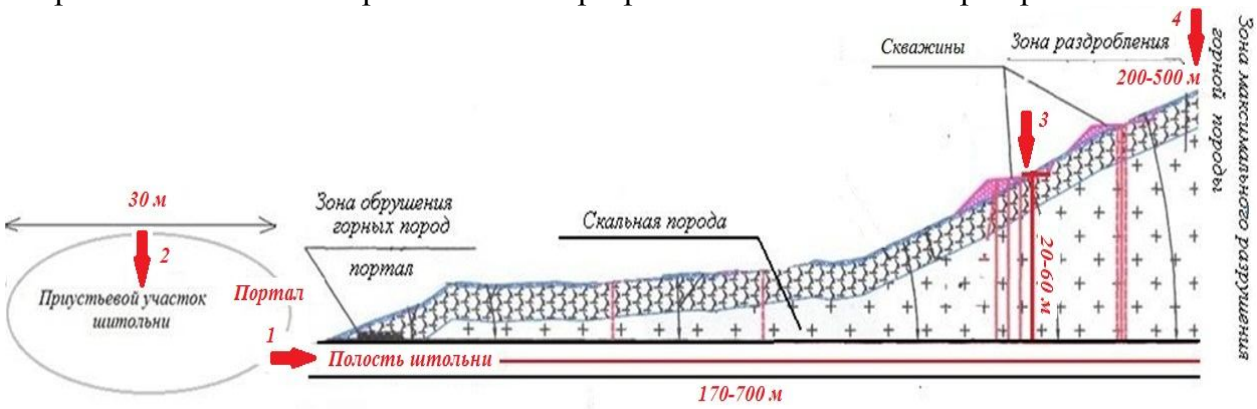


Рис. 1. Схематическое изображение штольни в горизонтальном разрезе

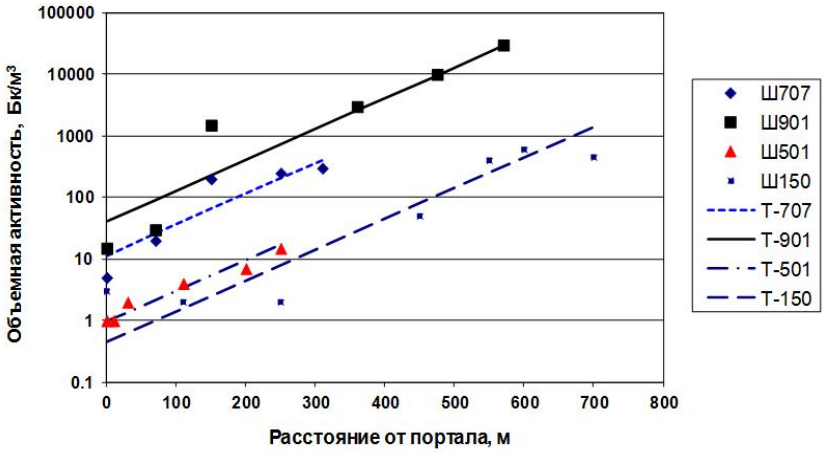
Распределение трития в воздушной среде внутри полости штолен и на их порталах. Исследование было проведено в 7-ми штольнях. Было установлено, что объемная активность ^{3}H внутри полостей штолен изменяется в широком диапазоне значений – от 0,5 до 30 000 Бк/м^3 (Lyakhova et al., 2013). Результаты исследований по каждой штольне представлены на рис. 2.

Максимальные концентрации ^{3}H наблюдаются вблизи концевых боксов. Экспоненциальное уменьшение объемной активности по мере приближения к выходу из штольни может быть объяснено возрастающим разбавлением за счет поступления атмосферного воздуха и частичным выносом загрязнённого воздуха штольни через трещины разрушенной скальной породы.

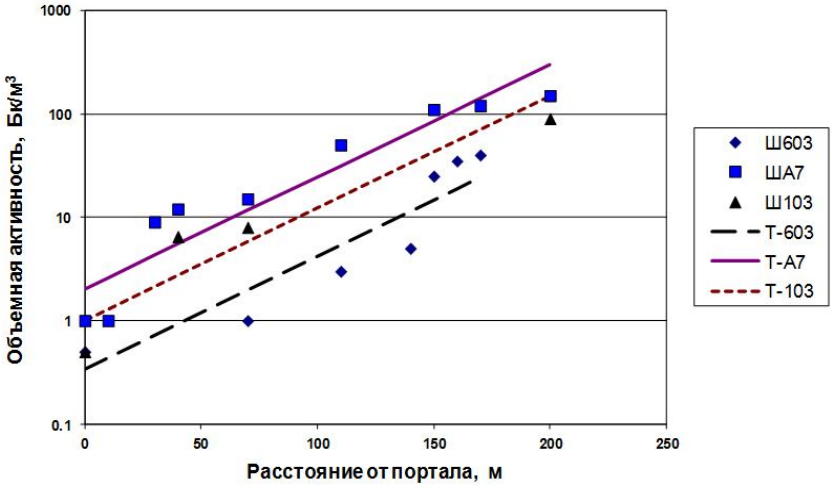
Так как на портале штолен были зафиксированы детектируемые количества ^{3}H в воздухе, было сделано предположение, что ^{3}H может эманировать из полости штольни на открытую поверхность, даже если штольня «законсервирована». Для оценки эманации ^{3}H из полости были проведены исследования приустьевых участков

7-ми «законсервированных» штолен. Пробы штольневого воздуха отбирались на портале штольни, пробы атмосферного воздуха - на удалении от него на расстояние 50 м (табл. 1).

Объемная активность ^3H на портале штольне изменяется в пределах от 0,5 до 16 Бк/м^3, в атмосферном воздухе – от 0,3 до 2,5 Бк/м^3 (Lyakhova et al., 2013). Результаты исследования показали принципиальную возможность выхода ^3H с воздушными потоками из полостей штолен в воздушную среду исследуемого участка.



а



б

Рис. 2. Распределение объемной активности ^3H внутри полости штолен: а) 707, 901, 501 и 150 (экспоненциальные функции $A_0 \cdot e^{0,0115x}$); б) 603, А7, 103 (экспоненциальные функции $A_0 \cdot e^{0,025x}$)

Таблица 1. Объемная активность ^3H в штольневом и атмосферном воздухе

№п/п	Номер штольни	Объемная активность ^3H на портале штольни, Бк/м^3	Объемная активность ^3H на расстоянии 50 м от портала штольни, Бк/м^3
1	104	5,2	2,5
2	511	7,2	1,2
3	165	10,7	0,55
4	609	8,5	3,3
5	802	16	0,8
6	103	6	1,56
7	604	0,5	0,3

Содержание трития на приустьевых участках штолен. Исследование проведено на участках 16-ти штолен. На каждом приустьевом участке отобрано и

проанализировано по одной пробе атмосферного воздуха, отобранного на расстоянии 20-ти метров от портала. Установлено, что объемная активность ^{3}H на приустьевых участках варьирует от 0,7 до 3,3 Бк/м^3 (Lyakhova et al., 2013). Результаты исследований представлены в табл. 2.

Таблица 2. Объемная активность ^{3}H на приустьевых участках штолен

№п/п	Номер штольни	Объемная активность ^{3}H, Бк/м^3	№п/п	Номер штольни	Объемная активность ^{3}H, Бк/м^3
1	136	0,7	9	129	1,6
2	501	2	10	175	2
3	707	2	11	136	2,7
4	150	3,3	12	107	1
5	169	2	13	Ж-3	2
6	505	2	14	111	3
7	А7	0,2	15	110	3,2
8	901	0,7	16	114	2,9

Проведенное исследование подтвердило наличие процессов эманации ^{3}H из полости штолен в атмосферный воздух. Во всех случаях, исключая приустьевой участок штольни А7, содержания ^{3}H превысило фоновый уровень от 3,5 до 15 раз. Максимальное превышение фона, в 16,5 раза было зафиксировано на приустьевом участке штольни 150. Превышение фона более чем в 10 раз – отмечено на приустьевых участках штолен 136, 111, 110 и 114 (Lyakhova et al., 2013).

Исследование содержания трития в местах расположения вертикальных геологических скважин, пробуренных в тело штольни. Данный этап исследования проводили с целью оценки поступления ^{3}H из тела штольни над ее полостью сквозь трещиноватости в горной породе, а также по скважинам, пробуренным в штольни сверху. Исследования были проведены на 7-ми штольнях. Результаты измерений объемной активности ^{3}H в атмосферном воздухе представлены в табл. 3.

Таблица 3. Объемная активность ^{3}H в местах расположения геологических скважин

№п/п	Номер штольни	Объемная активность ^{3}H до бурения скважины, Бк/м^3	Объемная активность ^{3}H после бурения скважины, Бк/м^3
1	185	2	10
2	208	0,8	4,5
3	129	0,6	1,1
4	107	0,2	4
5	175	0,3	4,2
6	132	0,6	8
7	505	0,2	0,8

Результаты измерений показали, что над всеми штольнями произошло увеличение концентрации ^{3}H в атмосфере от 4 до 20 раз сразу после бурения скважин (Lyakhova et al., 2013). Превышение уровня концентрации ^{3}H в воздухе над фоновыми значениями до бурения скважин говорит о том, что ^{3}H поступает в атмосферу путем миграции по зонам разуплотнения скальных пород, расположенных над штольней.

Исследование содержания трития в зоне максимального раздробления горных пород над полостью ПЯВ. Исследования проведены с целью оценки возможности поступления ^{3}H сквозь трещины в скальных породах в местах их максимального разрушения над полостью штольни. Предполагали, что такие участки

ориентировочно должны быть расположены над концевым боксом штольни – в эпицентральной зоне взрыва. Исследования были проведены на 15-ти штольнях.

Объемная активность ^{3}H на участках исследования изменялась в пределах от 0,1 до 4 Бк/м^3 (Lyakhova et al., 2013). Полученные значения объемной активности ^{3}H в атмосферном воздухе в ряде случаев превысили фоновый уровень от 1,5 до 15 раз (рис. 3).

Взаимосвязи между уровнями объемной активности ^{3}H и мощностью проведенных взрывов и их количеством установлено не было. Проведенные исследования показали, что полость штольни до настоящего времени все еще является источником поступления ^{3}H в атмосферный воздух. Концентрация ^{3}H в воздушной среде в районе расположения штолен в единицы и десятки раз превышает фоновый уровень для данного участка.

Рис. 3. Содержание трития в атмосфере в зоне максимального раздробления над полостью ПЯВ

3.3. Распределение трития в воздушной среде в районе расположения штолен с водопроявлениями.

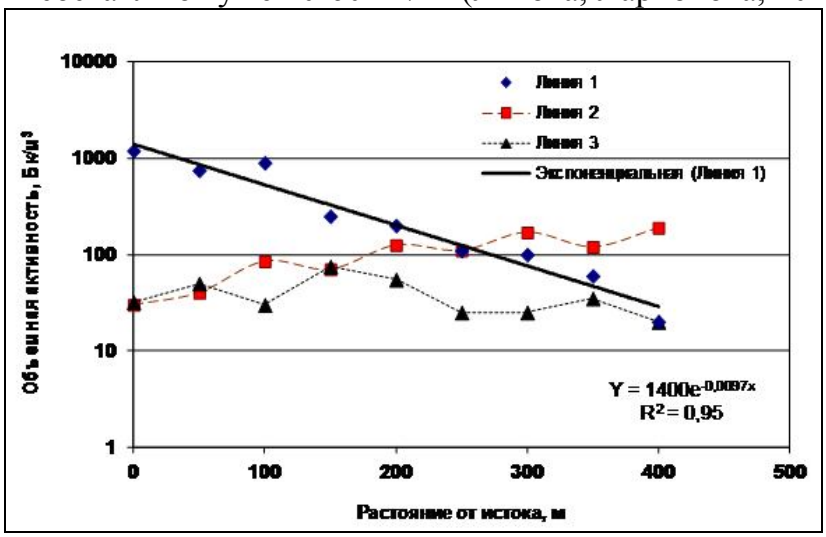
Учитывая высокие уровни концентрации ^{3}H в воде на исследуемой территории, предполагали, что штольневый водоток может являться источником поступления ^{3}H в воздушную среду. Детальные исследования были проведены в экосистемах водотоков штолен №176 и №177, расположенных в притоке ручья Байтлес и притоке ручья Узынбулак соответственно. Особенностью выбранных участков является наличие штолен с водопроявлением в виде открытых водотоков, выходящих на поверхность у порталов штолен. Протяженность русла составляет 400-600 м, с постепенным пересыханием водотока по мере удаления от портала, среднегодовая удельная активность ^{3}H в воде - 350 кБк/л на штольне №176 и 550 кБк/л - на штольне №177 (Лукашенко и др., 2011).

Для изучения распределения ^{3}H в воздушной среде отбор проб атмосферного воздуха проводили в продольном и поперченном направлении относительно русла. В продольном направлении исследование проводили по трем линиям, расположенным параллельно руслу. Первая линия (Линия 1) располагалась на расстоянии не более 50 см от кромки воды, линия 2 располагалась с левой стороны русла, линия 3 – с правой стороны русла на расстоянии приблизительно 50 м от ручья. Расстояние между точками отбора проб по линиям также составляло 50 м. В поперечном направлении от русла отбор проб проводили по профилям с постепенным удалением

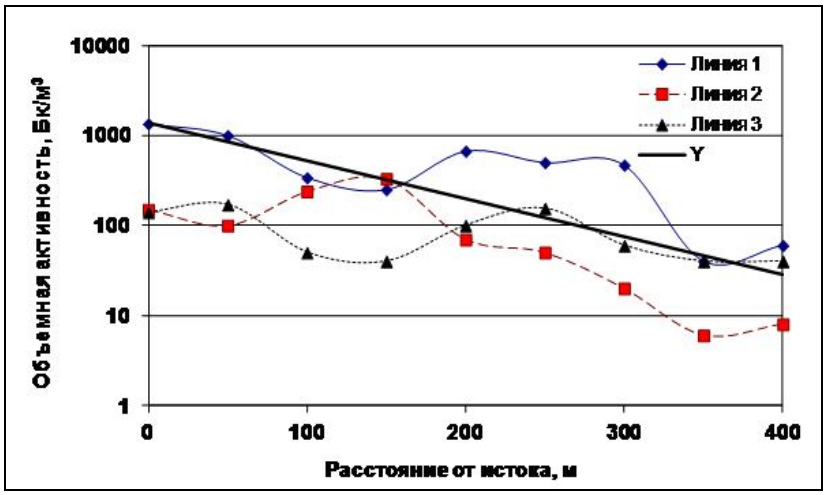
от русла, начиная от кромки воды. Расстояние между профилями составляло 50-100 м, между точками измерений в профилях – 5-15 м равнозначно в правую и левую сторону от ручья.

Исследование распределения трития в атмосферном воздухе в продольном и поперечном направлении относительно русла штольневого водотока. На данном этапе было отобрано и проанализировано 54 пробы атмосферного воздуха (рис. 4).

Максимальная объемная активность ^{3}H в русле водотоков составляла 1200 Бк/м^3 и 1350 Бк/м^3 для штолен 176 и 177 соответственно (Ляхова, Ларионова, 2010). Изменение с расстоянием объемной активности ^{3}H в воздухе по Линии 1 у штольни 176 хорошо описывается экспоненциальной функцией Y=1400exp(-0,0097x), (R^2 =0,95). По обоим водотокам отмечена общая тенденция на уменьшение концентрации ^{3}H в атмосфере с увеличением расстояния от портала штольни - по мере протяженности ручья, объемная активность ^{3}H в воздухе значительно снижаются и на расстоянии 400 м составляют уже 40-60 Бк/м^3 (Ляхова, Ларионова, 2010).



а



б

Рис. 4. Распределение объемной активности ^{3}H в воздухе по линиям вдоль водотока а) из штольни 176; б) из штольни 177 (Y –тренд для Линии 1 у штольни 176)

Для исследования в поперечном направлении относительно русла было отобрано и проанализировано 40 проб водяных паров в 4-х профилях на водотоке штольни 177 (рис. 5).

Объемная активность ^3H в воздухе с увеличением расстояния от ручья значительно уменьшается – от 500-1300 Бк/м^3 вблизи русла до 20-30 Бк/м^3 на расстоянии 70-100 м в сторону. Из графика видно, что чем дальше расстояние по ручью, тем меньше ширина распространения ^3H в воздухе относительно русла. Наибольшие концентрации ^3H характерны для мест выхода ручьев на поверхность, и приурочены к береговой зоне ручья.

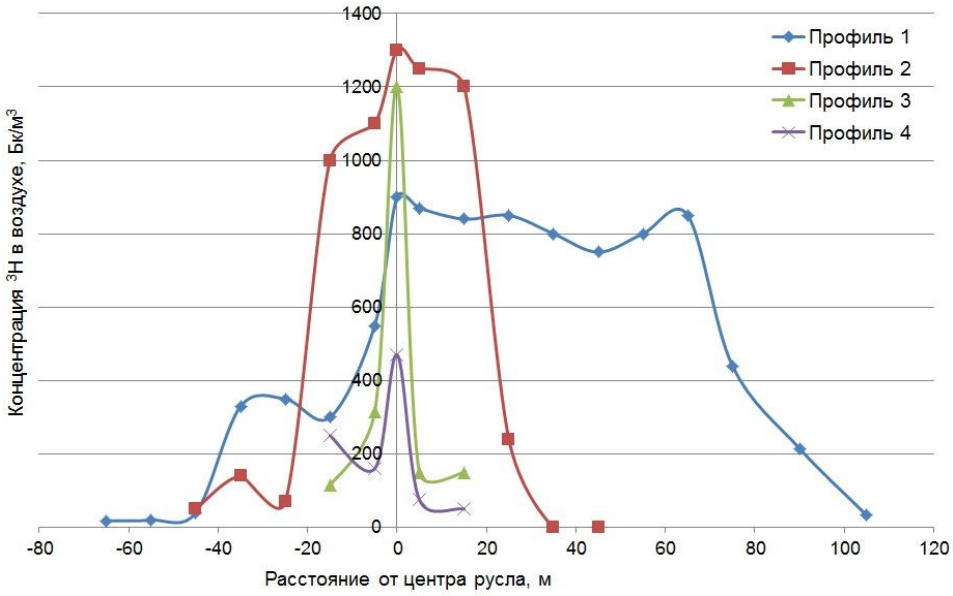


Рис. 5. Распределение объемной активности ^3H в воздухе по мере удаления от водотока

3.4 Изучение основных источников поступления и механизмов распределения трития в атмосферном воздухе экосистем штолен с водопроявлением.

Распределение трития в системе вода – атмосферный воздух. Исследование проводили с целью оценки тритиевого загрязнение воздушной среды и изучения характера распределения ^3H вблизи поверхностного водотока. Вдоль русла водотока штольни 177, был произведен сопряженный отбор проб водяных паров воздуха и воды (табл. 4).

Таблица 4. Концентрация ^3H в воде и атмосферном воздухе (экспериментальные данные)

№п/п	Концентрация ^3H в воде, Бк/л	Концентрация ^3H в воздухе, Бк/м^3	Воздух/вода, л/м^3
1	375 000	200	5,3E-04
2	370 000	170	4,6E-04
3	380 000	255	6,7E-04
4	370 000	100	2,7E-04
5	350 000	170	4,9E-04
6	330 000	125	3,8E-04
7	265 000	100	3,8E-04
8	170 000	50	2,9E-04
9	145 000	125	8,6E-04
10	200 000	115	5,8E-04
11	140 000	80	5,7E-04

Согласно результатам удельная активность ^3H в воде изменяется от 145 до 380 Бк/л, объемная активность ^3H в воздухе составляла от 50 до 255 Бк/м^3 (Ляхова, Ларионова, 2010).

Проведенные исследования показали, что отношение объемной активности ^3H в атмосферном воздухе к объемной активности ^3H в воде составило $(4,6 \pm 1,3)\cdot 10^{-4}$ л/м^3 (относительная ошибка 28%). Величина концентрации ^3H в атмосфере зависит от интенсивности испарения водяных паров с поверхности ручья, которая, в свою очередь будет зависеть от разницы температур воды и воздуха, относительной влажности воздуха и скорости ветра, в связи с чем, объемная активность ^3H в воздухе вблизи открытого водного источника может изменяться в разы при одинаковой удельной активности ^3H в воде.

Распределение трития в системе почвенный воздух – растения - атмосферный воздух. С целью установления связей между содержанием ^3H в растениях, почве и атмосферном воздухе на различных расстояниях от русла ручья из штольни №177 по четырем поперечным профилям был произведен одновременный отбор проб влаги в почве и атмосферном воздухе, а также проб растительности. На каждом участке было проведено определение биомассы растительного покрова.

Анализ показал, что невозможно раздельно установить связь между удельной активностью ^3H в растениях и объемной активностью ^3H в атмосферном или почвенном воздухе. В то же время между нормированной на единичную площадь (1 м^2) активностью ^3H в растительности $A_{раст}$ [Бк/м^2], определяемой перемножением биомассы $M_{раст}$ [кг/м^2] на удельную активность растений $C_{раст}$ [Бк/кг], и объемной активностью ^3H в атмосферном воздухе $C_{атм}$ [Бк/м^3] наблюдается пропорциональная зависимость с коэффициентом корреляции $R^2 = 0,81$ (рис. 6).

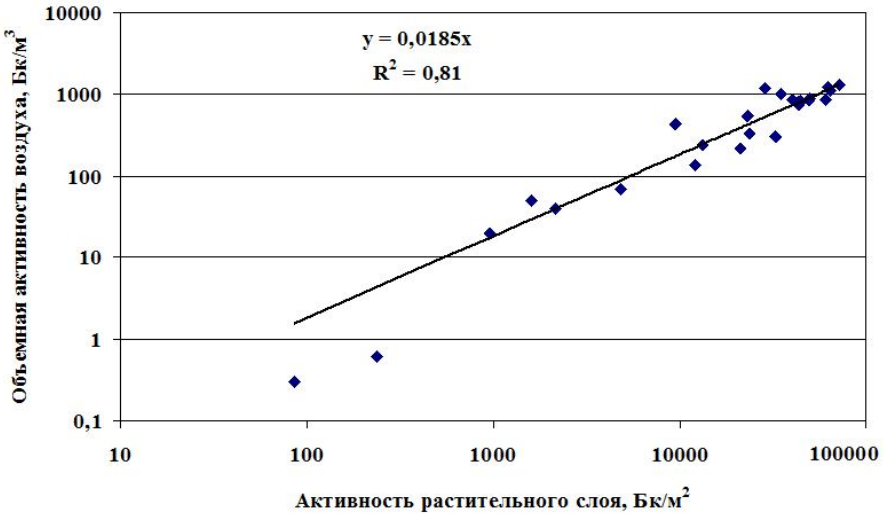


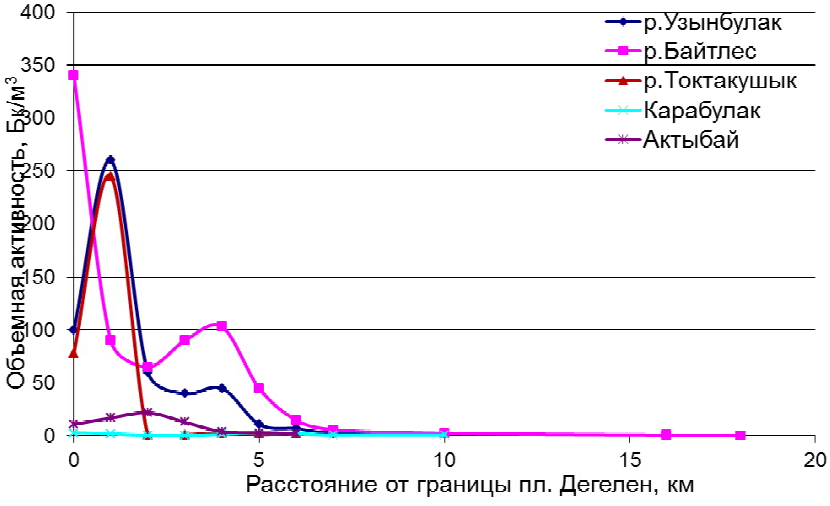
Рис. 6. Зависимость объемной активности ^3H от активности растительного слоя

Отсутствие корреляции между содержанием ^3H в почвенном воздухе и удельной, или общей активности ^3H в растениях, говорит о том, что условия отбора проб конденсата над участком со срезанными растениями не отражают истинного содержания ^3H в почве, что в свою очередь говорит о необходимости учета всех источников поступления ^3H в атмосферу.

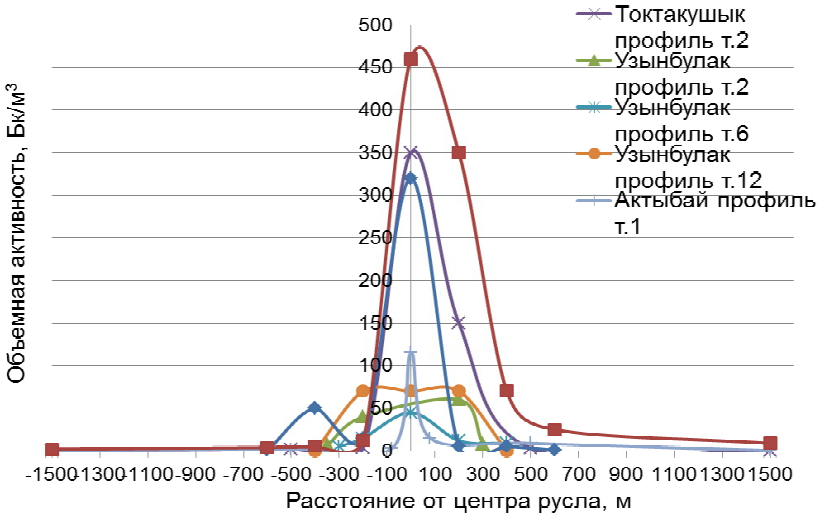
3.5 Изучение уровня и характера распределения трития в атмосферном воздухе за пределами площадки «Дегелен». На данном этапе было проведено исследование возможных зон выноса ^3H за пределы площадки с поверхностными водотоками, а также исследование характера распределения ^3H в воздушной среде в продольном (рис. 7, а) и в поперечном направлении (Рис. 7, б) относительно русла. основных ручьев за пределами испытательной площадки.

Результаты исследования показали, что основное загрязнение ^3H воздушной среды за пределами площадки «Дегелен» территориально приурочено к руслам основных ручьев.

Зона максимального содержания ^3H в воздухе расположена в пределах 5 км от границы площадки «Дегелен», далее содержание ^3H идет на спад и на 10 км от границы составляет уже единицы Бк/м^3. Объемная активность ^3H в поперечном направлении относительно русла уменьшается с увеличением расстояния от центра русла, максимальные значения концентрации ^3H в воздухе наблюдаются вблизи русла на расстоянии не более 500 м (Ляхова, Ларионова, 2013).



а)



б)

Рис. 7. Характер распределения трития в воздушной среде за пределами площадки «Дегелен»

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТРИТИЯ В ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ НА ТЕРРИТОРИИ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ ПЛОЩАДКИ «БАЛАПАН»

Исследование приустьевых участков боевых скважин. Для проведения исследования на приустьевых участках боевых скважин был проведен сопряженный отбор проб водяных паров атмосферного и почвенного воздуха для исследования содержания ^3H (рис.8). На основе анализа полученных данных было выбрано 6 скважин для более детального площадного исследования приустьевых участков (рис. 9).

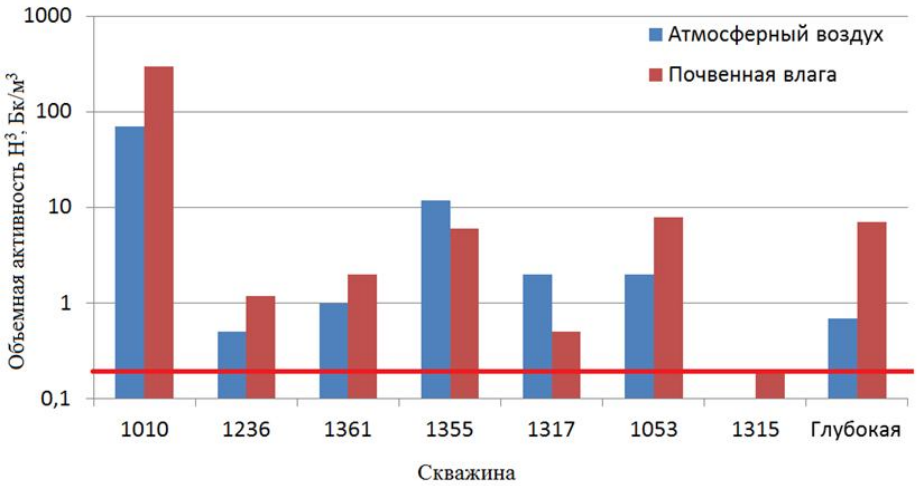


Рис. 8. Содержание трития в водяных парах атмосферного воздуха и почвенной влаги

Объемная активность ^{3}H в почвенной влаге для разных скважин изменяется в переделах от <0,2 до 300 Бк/м^3, в атмосферном воздухе – от <0,05 до 70 Бк/м^3 (Lyakhova et al., 2013). Значительная концентрация ^{3}H в почвенной влаге показывает возможность выхода его выхода ^{3}H на поверхность из полостей ПЯВ. Было проведено исследование пространственного распределения ^{3}H в воздушной среде над скважинами проведенных испытаний. Вид распределений на примере трех скважин – «Глубокая», 1355 и 1361 показан на рис. 9.

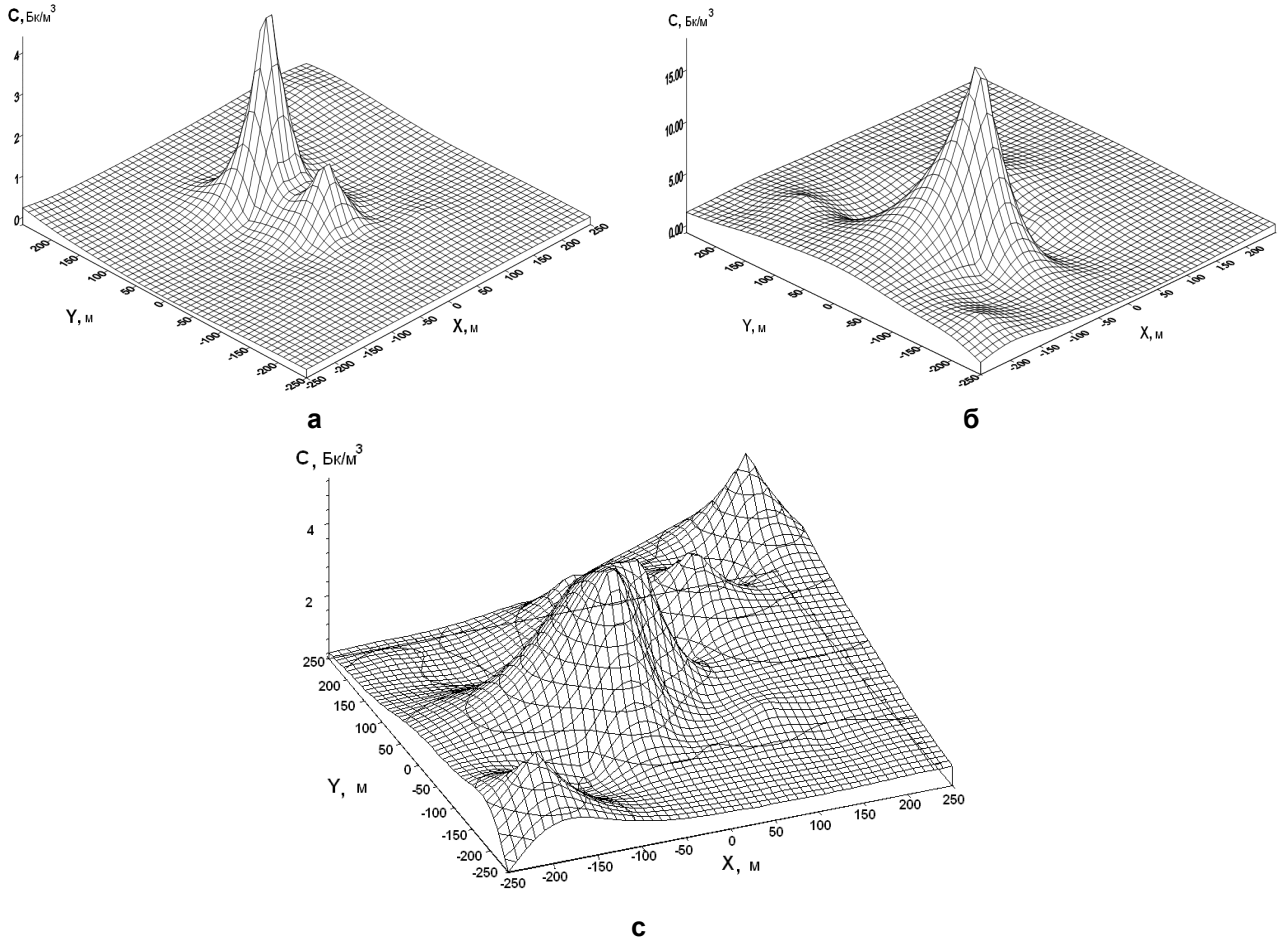


Рис. 9. Пространственное распределение трития в почвенном воздухе над скважинами «Глубокая» (а), №1355 (б) и №1361.

Установлено, что в отдельных случаях на графиках имеется несколько пиков, что говорит о возможности выхода ^{3}H на поверхность земли в нескольких местах, на расстоянии до 200 м от центра скважины. Величина выхода ^{3}H и его местоположение различна для разных приустьевых участков. Это может быть связано с количеством проведенных взрывов и глубиной залегания их полостей, с нарушениями ландшафта поверхности и наличия внутренних полостей и дополнительных зон трещиноватости, а также с наличием развитой зоны грунтовых вод, значительно загрязненных ^{3}H и залегающих на небольшой глубине.

ГЛАВА 5. ИССЛЕДОВАНИЕ УРОВНЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ТРИТИЯ В ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ И В ПОЧВЕ В МЕСТАХ ПРОВЕДЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ, НАЗЕМНЫХ И ЭКСКАВАЦИОННЫХ ЯДЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ.

Для исследования были выбраны испытательная площадка «Опытное поле», где проводились наземные, воздушные ядерные испытания и место проведения экскавационного взрыва – «Атомное» озеро. На площадке «Опытное» поле участками исследования являлись эпицентры взрывов, на территории «Атомного» озера - воронка взрыва и внешнее водохранилище, образовавшееся в результате проведения испытаний. На каждом из участков были отобраны пробы почвы и почвенного воздуха. В общей сложности отобрано и проанализировано 11 проб воздуха и 28 проб почвы для определения удельной активность ^{3}H и ^{152}Eu (табл. 5).

Согласно полученным результатам установлено, что в местах проведения наземных, воздушных и экскавационных ядерных испытаний не происходит активного процесса эманации ^{3}H с поверхности почвы в атмосферу. Тритий в почвенном воздухе был зафиксирован на гребне воронки «Атомного» озера, значения удельной активности изменялись от 10 до 90 Бк/м^{3}. Результаты исследования почвы показали высокое содержание ^{3}H и ^{152}Eu. Удельная активность ^{3}H в почве изменялась от 280 до 65000 Бк/кг, удельная активность ^{152}Eu в пробах почвы составляла от 10 до 32000 Бк/кг (Ляхова О.Н., 2013).

Таблица 5. Удельная активность трития и европия-152 в почве

№п/п	Исследуемая территория	Объект	Удельная активность трития (^{3}H) в почве, Бк/кг	Удельная активность европия ^{152}Eu в почве, Бк/кг	Объемная активность трития (^{3}H) в почвенном воздухе, Бк/м^{3}
	Наземные и воздушные испытания (площадка «Опытное поле»)				
1	Площадка П1	т.1	280 ± 30	440 ± 50	< 0,5
2	Площадка П1	т.2	14700 ± 1500	5900 ± 600	
3	Площадка П1	т.3	5400 ± 600	3250 ± 350	
4	Площадка П1	т.4	9300 ± 1000	2300 ± 250	
5	Площадка П1	т.5	2100 ± 200	1700 ± 200	
6	Площадка П1	т.6	50 500 ± 5 000	32 000 ± 3000	
7	Площадка П1	т.7	650 ± 150	360 ± 40	
8	Площадка П1	т.8	3 200 ± 400	1 700 ± 200	
9	Площадка П1	т.9	35 000 ± 3000	18 000 ± 2000	
10	Площадка П1	т.10	1 700 ± 200	1 100 ± 100	
11	Площадка П2	т.3	1 500 ± 150	760 ± 70	< 0,5
12	Площадка П2	т.4	5 000 ± 500	2 500 ± 200	
13	Площадка П2	т.5	11 200 ± 1000	5 000 ± 500	
14	Площадка П2	т.6	3 800 ± 400	2 300 ± 250	
15	Площадка П3	т.1	1 300 ± 150	1 100 ± 100	< 0,5
16	Площадка П3	т.2	3 800 ± 500	2 200 ± 200	
17	Площадка П5	т.1	20 000 ± 2 000	7 500 ± 800	< 0,5
18	Площадка П5	т.2	17 500 ± 2 000	7 000 ± 700	

№п/п	Исследуемая территория	Объект	Удельная активность трития (^3H) в почве, Бк/кг	Удельная активность европия ^{152}Eu в почве, Бк/кг	Объемная активность трития (^3H) в почвенном воздухе, Бк/м^3
19	Площадка П7	т.1	5 400 ± 500	3 000 ± 300	< 0,5
20	Площадка П7	т.2	4 000 ± 400	2 000 ± 200	
	Эпицентр экскавационного взрыва				
1	«Атомное» озеро	т.1	65 000 ± 7000	12 500 ± 1500	90 ± 10
2	«Атомное» озеро	т.2	55 000 ± 4000	6 000 ± 500	10 ± 2
3	«Атомное» озеро	т.3	8 000 ± 700	1 400 ± 200	12 ± 2
4	«Атомное» озеро	т.5	1650 ± 700	750 ± 80	< 0,5
5	«Атомное» озеро	т.6	< 150	< 2	< 0,5
Участки исследования с концентрацией ^3H в почве менее предела чувствительности методики, Бк/кг					
1	Площадка П2	т.1	< 150	20 ± 5	-
2	Площадка П2	т.2	< 150	10 ± 2	-
3	«Атомное» озеро	т.4	< 150	< 2	< 0,5

ГЛАВА 6. ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТРИТИЯ В ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ РЕКИ ШАГАН.

Река Шаган является левобережным притоком р. Иртыш и протекает с восточной стороны территории СИП. Концентрациями ^3H в поверхностных, приповерхностных и подземных водах реки может достигать $n \cdot 10^5$ Бк/л. Исследование содержания ^3H в воздухе проводили путем изучения уровня концентрации ^3H в атмосферном и почвенном воздухе.

6.2 Исследование распределения трития в атмосферном воздухе в русле реки Шаган. Изучения уровня и характера распространения ^3H в атмосферном воздухе проводили по профилю, заложенному в поперечном направлении относительно русла реки с постепенным удалением от него в правую и левую сторону на расстояние 40 м. На данном этапе было отобрано и проанализировано 10 проб (рис. 10).

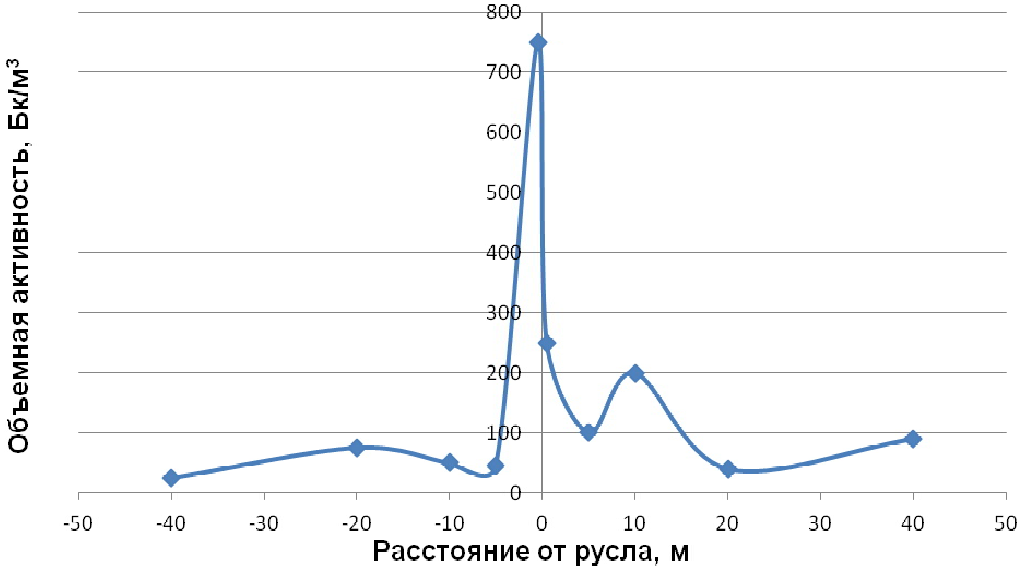


Рис. 10. Характер распределения ^3H в воздухе относительно русла реки

Согласно полученным результатам объемная активность ^3H в воздухе лежит в диапазоне 250 - 750 Бк/м^3. Максимальное поступление ^3H в воздух наблюдается в береговой зоне русла в пределах 10 м (рис. 10).

6.3 Исследование распределения трития в почвенном воздухе в зоне влияния реки Шаган.

По выделенным геоботаническим контурам были определены зоны для проведения отбора проб почвенного воздуха. В общей сложности было отобрано 33 пробы воздуха на разном удалении как от русла реки в поперечном направлении (до 12 км), так и от «Атомного» озера. Условно можно считать, что точки отбора были распределены по территории равномерно случайным образом. В связи с этим, было построено статистическое распределение объемной активности ^3H в почвенном воздухе, которое характеризует общую картину загрязнения на исследованной территории. В результате обработки данных измерений было установлено, что это распределение подчиняется экспоненциальному закону (рис. 11).

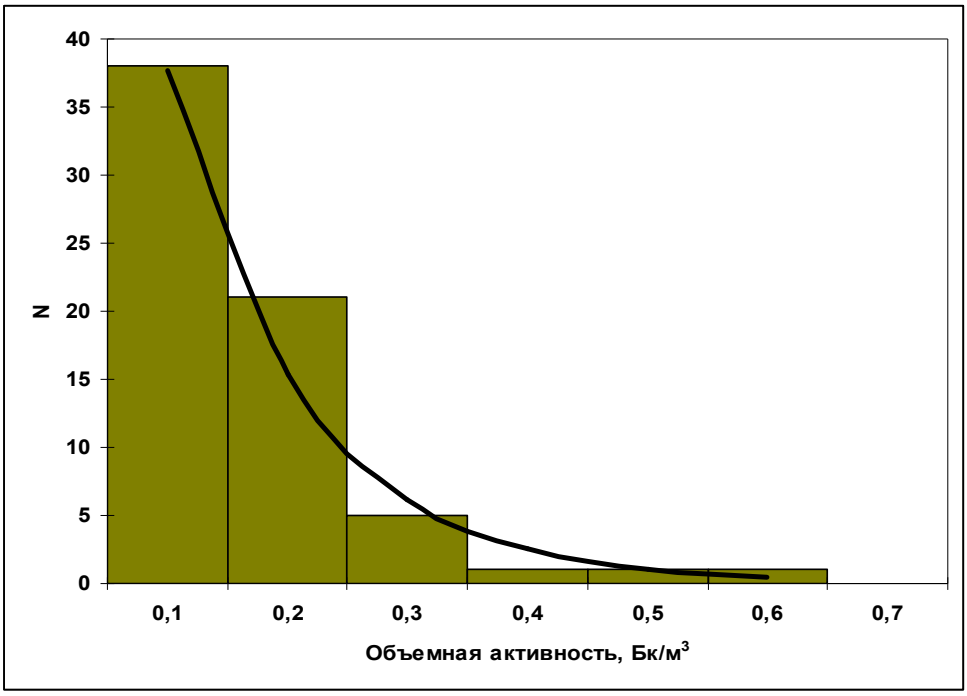


Рис. 11. Статистическое распределение результатов измерения объемной активности почвенного воздуха (сплошная линия – показательная функция, R^2=0,87)

В результате проведенных исследований было найдено, что содержание ^3H в почвенном воздухе варьирует от минимально детектируемых величин (0,03 Бк/м^3) до 6 Бк/м^3. Максимальное тритиевое загрязнение в зоне влияние реки Шаган приурочено к ее руслу и, как в случае с атмосферным воздухом, территориально приурочено к месту максимального загрязнения ^3H воды. Среднее значение содержания ^3H в почвенном воздухе на данной территории составило 0,11 Бк/м^3, медиана – 0,08 Бк/м^3, дисперсия – 0,08 Бк/м^3.

ВЫВОДЫ

1. Впервые проведено комплексное исследование уровня и характера распределения ^3H в воздушной среде на территории Семипалатинского испытательного полигона. Установлено, что на территории полигона сформировались локальные участки тритиевого загрязнения окружающей среды вблизи мест проведения испытаний ядерного оружия и связанных с ними водотоков.

2. Основные источники поступления ^3H в воздушную среду – поверхностные воды и растительность. Дополнительный вклад вносят подземные воды и почвенный воздух. Анализ полученных данных в целом показал, что общее количество поступающего ^3H и наличие тех или иных источников его поступления в воздушную среду будут зависеть от вида проводимых испытаний. Наибольшие концентрации ^3H

в воздухе наблюдаются вблизи штольневых закладок боеприпасов. Наименьшие – на месте проведения эскавационных и воздушных взрывов.

3. Установлено, что изменение объемной активности ^3H внутри полости штолен ПЯВ происходит по экспоненциальном закону. Максимальная концентрация ^3H характерна для мест расположения концевых боксов штольни и достигает 30000 Бк/м^3. Распределение ^3H в воздушной среде на приустьевых участках штолен не носит масштабного характера и по мере удаления от штольни содержание ^3H в воздухе резко снижается. В среднем объемная активность ^3H в районе расположения штолен составляет от 1 до 10 Бк/м^3.

4. Наибольшее влияние на загрязнение ^3H воздушной среды оказывают штольневые водотоки и ручьи. Объемная активность ^3H в береговой зоне штольневых водотоков по мере удаления от истока снижается по экспоненте от 1300 Бк/м^3 до 20 Бк/м^3 на расстоянии 400 м. В русле ручьев, расположенных за пределами испытательной площадки, уровень содержания ^3H в воздухе находится в пределах от 0,2 до 450 Бк/м^3. Пространственное распределение ^3H в воздухе по мере удаления от русла в сторону не носит масштабный характер, максимальное содержание ^3H в воздухе приурочено к береговой зоне водотока на удалении от 10 до 500 м от истока и зависит от ландшафта в пойме ручья.

5. Исследование пространственного распределения ^3H в воздушной среде на приустьевых участках скважин показало, что максимальный выход ^3H наблюдается вблизи устья скважины, а в ряде случаев имеется несколько мест выхода ^3H на поверхность. Объемная активность ^3H в воздушной среде варьирует от <0, 03 до 70 Бк/м^3, в среднем значение содержание ^3H на приустьевых участках скважин не превышает 5 Бк/м^3.

6. В результате исследования тритиевого загрязнения мест проведения наземных, воздушных и экскавационных ядерных испытаний установлено, что на данной территории нет значимых источников поступления ^3H в воздушную среду. Основной вклад в тритиевое загрязнение территории дает ^3H, содержащийся в почве. Удельная активность ^3H в почве составляет от 280 до 65000 Бк/кг.

7. В русле реки Шаган максимальное тритиевое загрязнение воздуха зафиксировано на участке с максимальным содержанием ^3H в воде на расстоянии 5 км от «Атомного озера». Пространственное распределение ^3H в воздушной среде показало, что в целом наблюдается тенденция к уменьшению уровня объемной активности с увеличением расстояния от русла. Максимальное содержание ^3H составляет 750 Бк/м^3 вблизи русла и 25-40 Бк/м^3 при удалении на расстояние 40-50 м. Статистическое распределение объемной активности ^3H в почвенном воздухе на удалении от русла до 12 км, которое характеризует общую картину загрязнения на исследованной территории, подчиняется экспоненциальному закону. Содержание ^3H в почвенном воздухе изменяется в пределах от <0,03 до 6 Бк/м^3, среднее значение на данной территории составляет 0,11 Бк/м^3.

8. Оценка загрязнения воздушной среды СИП, проведенная на основе всех полученных данных, показала, что тритиевое загрязнение воздуха в настоящее время характерно только для территории полигона и не выходит за его границы. Наиболее загрязненными участками являются площадка «Дегелен», место проведения ПЯВ в штольнях и река Шаган. Площадка «Балапан» вносит вклад в тритиевое загрязнение атмосферы, но в значительно меньшей степени. В местах проведения наземных и воздушных ядерных испытаний ^3H в воздушной среде не содержится в детектируемых количествах.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Lyakhova O.N. 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.
2. Lyakhova O.N. Tritium as an indicator of venues for nuclear tests" / O.N. Lyakhova. // Journal of Environmental Radioactivity .– 2013. – Vol. 124. – P. 13-21.

В сборниках статей и материалах конференций:

3. Lyakhova O.N. Formation of tritium contamination of air basin at the sites of underground nuclear explosions at the former Semipalatinsk test site area / O.N. Lyakhova, S.N. Lukashenko, N.V. Larionova // Book of Abstracts «Environmental radioactivity», Rome 25th-27th, October, 2010. – Rome, 2010.
4. Lyakhova O.N. Tritium in the air as an indicator of nuclear testing venues» / Lyakhova O.N., S.N. Lukashenko, N.V. Larionova // Book of Abstracts «Comprehensive nuclear-test-ban treaty: science and technology», 8-10 June, 2011, Hofburg. – Vienna, 2011 – P. 105
5. Lyakhova O.N. Development of effective radionuclide methods for identification of nuclear testing venues / O.N. Lyakhova , C.N. Lukashenko, N.V. Larionova, A.O. Aydarkhanov // Book of Abstracts «Comprehensive nuclear-test-ban treaty: science and technology», 13-17 June, 2013, Hofburg. –Vienna, 2013 – P. 98
6. Ляхова О.Н. Исследование содержания трития в объектах окружающей среды на территории испытательной площадки «Дегелен» / О.Н. Ляхова, С.Н. Лукашенко, С.Б. Субботин // Вестник НЯЦ РК. – 2007. - Вып. № 4(32). - С.80.
7. Ляхова О.Н. Исследование характера распределения трития в атмосферном воздухе экосистемы водотока штольни №176 площадки «Дегелен» / О.Н. Ляхова, С.Н. Лукашенко, М.А. Умаров, А.О. Айдарханов // Вестник НЯЦ РК. – Вып. 3(35). - 2008. - С. 52.
8. Ляхова О.Н. Исследование уровня и характера распределения трития в объектах окружающей среды на территории СИП. Ядерный потенциал Республики Казахстан, сборник докладов / О.Н. Ляхова, С.Н. Лукашенко, С.Б. Субботин, А.О. Айдарханов, А.М. Кубенов // Ассоциация «Ядерное общество Казахстана». - Алматы, 2008. - С. 99.
9. Ляхова О.Н. Выявление основных источников поступления трития в атмосферный воздух и оценка уровня загрязнения тритием воздушной среды горного массива Дегелен / О.Н. Ляхова, С.Н. Лукашенко, А.О. Айдарханов // Проблемы биогеохимии и геохимической экологии. – 2010. - № 3 (14). – С.73 - 82.
10. Ляхова О.Н. Исследование уровней и характера загрязнения тритием воздушной среды экосистем штолен с водопроявлениями / О.Н. Ляхова, С.Н. Лукашенко, Н.В. Ларионова // Тяжелые металлы и радионуклиды в окружающей среде: мат. VI Междунар. научно-практической конф., 4-7 февраля 2010 г. - Семей, 2010. - Т.II. - С. 314-318.
11. Ляхова О.Н. Механизмы формирования загрязненности тритием воздушного бассейна в пределах горного массива «Дегелен» / О.Н. Ляхова, С.Н. Лукашенко, Н.В. Ларионова // Семипалатинский испытательный полигон. Радиационное наследие и перспективы развития: тез. докл. IV Междунар. научно-практической конф., 25-27 августа 2010. - Курчатов, 2010. - С.78-80.
12. Ляхова О.Н. Механизмы формирования загрязненности тритием воздушного бассейна в пределах горного массива «Дегелен» / О.Н. Ляхова, С.Н. Лукашенко,

Н.В. Ларионова // Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана [Сборник трудов Института радиационной безопасности и экологии за 2007 – 2009гг.] / под рук. Лукашенко С.Н. – Вып. 2. – Павлодар: Дом печати, 2010. – С. 321-330. - ISBN 978-601-7112-28-8.

13. Ляхова О.Н. Тритий как индикатор мест проведения ядерных испытаний /О.Н. Ляхова, С.Н. Лукашенко, Н.В. Ларионова // Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана [Сборник трудов Национального ядерного центра Республики Казахстан за 2010 г.] / под рук. Лукашенко С.Н. – Павлодар: Дом печати, 2011. – Т.2. - Вып. 3. – С. 121-142.
14. Ляхова О.Н. Уровень и характер распределения трития в воздушном бассейне СИП / О.Н. Ляхова, С.Н. Лукашенко, Н.В. Ларионова, Е.С. Тур // Семипалатинский испытательный полигон. Радиационное наследие и перспективы развития: тез. докл. V Междунар. науч.-практическая конф., 12-14 сентября. - Павлодар: Дом печати, 2012. - С.30.
15. Ляхова О.Н. Вклад различных источников поступления трития в воздушную среду на территории СИП / О.Н. Ляхова, С.Н. Лукашенко, Е.С. Тур // Актуальные вопросы мирного использования атомной энергии: мат. Междунар. конф., Молодых ученых и специалистов, 6-8 июня 2012 г. / отв. ред. К.К. Кадыржанов. - Алматы: ИЯФ НЯЦ РК, 2012. - С. 156-157.
16. 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 // Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана [Сборник трудов Национального ядерного центра Республики Казахстан за 2011-2012 гг.] / под рук. Лукашенко С.Н. – Павлодар: Дом печати, 2013. – Т.2. - Вып. 4– С. 75-84.
17. Ляхова О.Н. Тритий в воздухе как индикатор мест проведения ядерных испытаний / О.Н. Ляхова, С.Н. Лукашенко, Н.В. Ларионова [и др.]. // Наука и технологии, шаг в будущее: сб. тез. V всемирного конгресса инжиниринга и технологий – WCET-2012, 1-2 июня 2012 г. - Алматы, 2012. - С. 216.
18. Ляхова О.Н. Исследование содержание трития в почве в местах проведения ядерных испытаний на территории СИП / О.Н. Ляхова, С.Н. Лукашенко, А.О. Айдарханов // Современные проблемы загрязнения почв: сб. мат. IV Междунар. науч. конф., 27-31 мая 2013 г. – Москва: МГУ, 2013. – С.140-143.
19. Ляхова О.Н. Разработка эффективных радионуклидных методов идентификации мест проведения ядерных испытаний / О.Н Ляхова, С.Н. Лукашенко, Н.В. Ларионова, Д.В. Турченко, А.О. Айдарханов //Ядерная и радиационная физика: тез.докл.конф., 24-27 сентября, 2013г. - Алматы: РГП ИЯФ, 2013. – С.78.