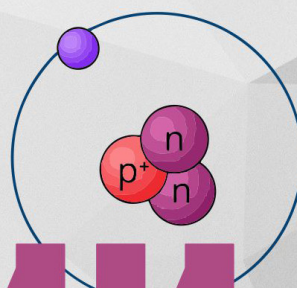


КОЛЬСКИЙ
НАУЧНЫЙ
ЦЕНТР



ТРИТИЙ

ТЕОРИЯ, ПРАКТИКА,
ПОСЛЕДСТВИЯ

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»
ИНСТИТУТ ХИМИИ И ТЕХНОЛОГИИ РЕДКИХ ЭЛЕМЕНТОВ
И МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ ИМЕНИ И.В. ТАНАНАЕВА

**Л. Г. Бондарева, М. Я. Чеботина,
С. Ю. Артамонова, И. Г. Тананаев**

ТРИТИЙ. ТЕОРИЯ, ПРАКТИКА, ПОСЛЕДСТВИЯ

*Авторы посвящают данный труд
75-летию юбилею ПО «Маяк» — первопроходцу в развитии
технологий трития*



Апатиты
Издательство Кольского научного центра
2024

УДК 502.175:546.11.027*3(28:470.5)
Т68

Печатается по решению Редакционного совета по книжным изданиям ФИЦ КНЦ РАН.

Рецензенты:

Сынзыныс Б. И. — докт. биол. наук, проф.;

Боровичев Е. А. — канд. биол. наук

Т68 **Тритий. Теория, практика, последствия** : монография / Л. Г. Бондарева, М. Я. Чеботина, С. Ю. Артамонова, И. Г. Тананаев. Апатиты : Изд-во Кольского научного центра, 2024. 359 с.: ил.

ISBN 978-5-91137-499-0

Обобщены результаты многолетних исследований по проблеме загрязнения тритием природных водных сред на территории Уральского региона, Сибирского федерального округа (Красноярский край, Республика Якутия — Саха), Семипалатинского испытательного ядерного полигона (Республика Казахстан). Приводятся данные о надфоновом загрязнении тритием различных природных объектов и сред, испытывающих воздействие атомных предприятий, по сравнению с контрольными территориями. Рассматривается загрязнение водоёмов, рек, болот, дождевых осадков, снежных выпадений, источников питьевого водоснабжения, биологических объектов (водные и наземные растения, рыбы) и мочи людей. На основе натуральных и модельных экспериментов оценивается потенциальный вред здоровью населения при воздействии загрязнённых тритием воздуха, воды, пищи.

Монография представляет интерес для специалистов радиоэкологов и гигиенистов, преподавателей и студентов экологических специальностей, а также для широкого круга читателей, которым не безразличны экологические проблемы наиболее уязвимых в плане тритиевого загрязнения регионов Российской Федерации и стран СНГ, в частности Республики Казахстан.

Научное издание
Редактор С.А. Шарам
Технический редактор В.Ю. Жиганов
Корректор С.А. Шарам
Подписано в печать 17.04.2024. Формат бумаги 70×108 1/16.
Усл. печ. л. 31,5. Заказ № 12. Тираж 500 экз.

ISBN 978-5-91137-499-0
DOI:10.37614/978.5.91137.499.0

© Бондарева Л. Г., Чеботина М. Я.,
Артамонова С. Ю., Тананаев И. Г., 2024
© Институт химии и технологии редких
элементов и минерального сырья
им. И.В. Тананаева, 2024
© ФИЦ КНЦ РАН, 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	8
РАЗДЕЛ 1. ТРИТИЙ.....	10
Глава 1. История открытия дейтерия и трития.....	10
Глава 2. Свойства трития.....	12
2.1. Физико-химические свойства трития.....	12
2.2. Химические свойства трития и его основные соединения.....	15
Глава 3. Производство трития. Объекты исследования.....	16
3.1. Атомные станции.....	16
3.2. Оружие.....	25
3.3. Общая характеристика объектов обследования.....	30
Глава 4. Применение трития в гражданских целях.....	32
4.1. Управляемый термоядерный синтез.....	33
4.2. Применение в медицине и биологии.....	40
4.3. Светосоставы постоянного действия.....	43
4.4. Тритиевые источники нейтронов, низкоэнергетического рентгеновского излучения.....	44
4.5. Другие способы применения трития.....	45
Глава 5. Тритий в ядерно-оружейном комплексе.....	46
5.1. Общее описание и устройство термоядерного боеприпаса.....	46
5.2. История создания термоядерного оружия.....	48
5.3. Нейтронное вооружение.....	52
Глава 6. Тритий в окружающей среде.....	54
6.1. Закономерности поведения трития в окружающей среде.....	59
6.2. Выбросы трития из выведённых из эксплуатации реакторов.....	66
6.3. Мониторинг содержания трития.....	68
Глава 7. Методы измерения трития. Отбор и пробоподготовка.....	73
7.1. Методы измерения трития.....	73
7.2. Методы отбора и подготовки проб для определения содержания окиси трития в приземном атмосферном воздухе и воде.....	81
7.3. Методы концентрирования трития.....	82
РАЗДЕЛ 2. ПРЕДПРИЯТИЯ УРАЛЬСКОГО РЕГИОНА.....	93
Глава 1. Производственное объединение «Маяк».....	93
1.1. Характеристика района исследований.....	93
1.2. Водоёмы производственного назначения.....	95
1.3. Водоёмы комплексного назначения.....	99
1.4. Дождевые осадки на промышленной территории.....	101
1.5. Снежный покров.....	103
1.6. Источники питьевого водоснабжения.....	107
1.7. Водная экосистема реки Теча.....	110
1.8. Водная экосистема реки Мишеляк.....	114
1.9. Район г. Озерска.....	116
Глава 2. Белоярская АЭС имени И.В. Курчатова.....	120
2.1. Характеристика района исследований.....	120

2.2. Белоярское водохранилище.....	121
2.3. Ольховская болотно-речная экосистема.....	127
2.4. Водная система реки Пышма.....	131
2.5. Воздушная среда.....	137
2.6. Дождевые и снеговые осадки.....	138
2.7. Источники питьевого водоснабжения населения.....	142
РАЗДЕЛ 3. СИБИРСКИЙ И ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЕ ОКРУГА	149
Глава 1. Горно-химический комбинат. Красноярский край.....	149
1.1. Описание объекта.....	149
1.2. Полигон «Северный». «Железногорский» ФГУП «НО РАО». Описание объекта.....	153
1.3. Поверхностные водные объекты бассейна реки Енисей — участок среднего и нижнего течения.....	155
1.4. Оценка загрязнения территории аэрозольным переносом трития.....	165
1.5. Тритий и питьевая вода.....	167
1.6. Накопление трития компонентами пресноводной экосистемы реки Енисей.....	167
1.7. Содержание трития в пойменных почвах и донных отложениях реки Енисей. Накопление и удерживание трития.....	171
Глава 2. Республика Саха (Якутия).....	176
2.1. Подземные ядерные взрывы.....	176
2.2. Фоновый уровень трития в поверхностных водах Якутии.....	182
2.3. Тритий в районе подземного ядерного взрыва «Кристалл».....	183
2.4. Тритий в районе подземного ядерного взрыва «Кратон-3».....	191
2.5. Тритий в поверхностных водах Среднеботуобинского нефтегазоконденсатного месторождения (район семи ПЯВ).....	202
РАЗДЕЛ 4. СЕМИПАЛАТИНСКИЙ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ПОЛИГОН, РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН.....	216
Глава 1. Площадка «Дегелен».....	224
1.1. Описание объекта.....	224
1.2. Исследование поведения радионуклидов, в том числе трития.....	228
1.3. Изучение основных источников поступления и механизмов распределения трития в атмосферном воздухе экосистем штолен с водопроявлением.....	236
Глава 2. Испытательная площадка «Балапан».....	239
2.1. Описание объекта.....	239
2.2. Исследование поведения трития.....	241
2.3. Содержание трития в снежном покрове.....	243
Глава 3. Площадка «Опытное поле».....	251
3.1. Описание объекта.....	251
3.2. Исследование уровня концентрации трития в воздушной среде и почве в местах проведения воздушных, наземных и экскавационных ядерных испытаний.....	253
3.3. Исследование распределения трития в воздушной среде в зоне влияния реки Шаган.....	255
3.4. Тритий в объектах окружающей среды в районе исследования.....	256

РАЗДЕЛ 5. ТРИТИЙ: АККУМУЛЯЦИЯ, ТРАНСФОРМАЦИЯ, ДОЗООБРАЗОВАНИЕ.....	272
Глава 1. Наземные экосистемы.....	272
1.1. Инкорпорирование трития культугой <i>Helianthus Annuus</i> при корневом поступлении.....	272
1.2. Инкорпорирование трития культурами перца и баклажана при кратковременном воздействии окиси трития.....	277
Глава 2. Водная экосистема.....	281
2.1. Ассимиляция и трансформация трития при взаимодействии с водными растениями.....	281
2.2. Ассимиляция трития в системах «вода — икра» и «вода — водные растения — рыба». Оценка воздействия трития на исследуемые организмы.....	287
Глава 3. Моделирование процессов воздействия трития на млекопитающих.....	299
3.1. Воздействие на млекопитающих, дозобразование.....	299
3.2. Радиобиологические основы нормирования радиоактивных веществ. Пути и принципы переноса экспериментальных данных с животных на человека.....	330
ЛИТЕРАТУРА.....	337

ВВЕДЕНИЕ

Уважаемые читатели хорошо знают, что в настоящее время известно более 270 стабильных и 2000 нестабильных изотопов — разновидностей химического элемента, атом которого имеет одинаковый заряд ядра и строение электронной оболочки, но отличается лишь числом нейтронов в ядре, а следовательно, и массой. Среди упомянутых изотопов существует узкий круг уникальных нуклидов, свойства которых изменяют не только жизнь человека, но и цивилизации. Наша книга посвящена одному из таких — изотопу водорода тритию (^3H) — и вот почему.

Сам водород по всем своим физическим и химическим свойствам уникален.

Во-первых, как самый лёгкий химический элемент, он является самым распространённым в живом веществе (углеводы, жиры, белки), гидро- и литосфере (вода, минералы; лат. *hydrogenium* происходит от сочетания «рождающий воду») и в космосе: даже масса Солнца и звезд на 70 % состоит из водородной плазмы. Кстати, русское наименование лёгкого газа — водорода — в 1824 г. предложил химик М. Ф. Соловьев.

Во-вторых, водород представляет собой простейшую электронную структуру: один протон с вращающимся вокруг электроном с огромной скоростью 2,25 км/с (или $7 \cdot 10^{15}$ об/с). Высокая скорость электрона не позволяет установить его положение в любой данный момент времени, что требует расчёта некоторых областей вероятности его нахождения (основа дуалистической корпускулярно-волновой природы частицы). Действительно, прекрасная модель для развития квантовой химии, в которой математические расчёты позволяют предсказать большинство химических и физических свойств элемента.

В-третьих, все три изотопа водорода (не случайно имеющие собственные названия — протий, дейтерий и тритий) обладают высокой практической значимостью.

Одновременно с этим широким фронтом развернулись работы перевода термоядерных реакций на мирные рельсы с целью обеспечения человечества доступной и дешёвой энергией. Сегодня мы используем энергию термоядерной реакции, протекающей в недрах Солнца и поступающей на Землю в виде света. Овладение управляемой термоядерной реакцией в земных условиях даёт человечеству новый, практически неиссякаемый источник энергии. Тритий также чрезвычайно широко используется в научных и прикладных исследованиях в области физики, химии, биологии, в медицине и др.

Тритий обладает чрезвычайными ядерными свойствами в части способности к реакции синтеза с выделением колоссальной энергии. Эти свойства изотопа предопределили пути его использования в области разработки термоядерного оружия для восстановления ядерного паритета.

В настоящей книге описаны исторические события открытия трития, его физико-химические и ядерные свойства, а также представлены основные методы его использования. Кроме того, обсуждены проблемы радиоэкологии трития — радиоактивного нуклида, выброшенного в окружающую среду в ходе беспрецедентно быстрой реализации ядерных оборонных программ. В связи с отсутствием опыта разработки и эксплуатации этих производств первопроходцам

не удалось избежать недоработок и просчётов в технологических процессах, повлекших крайне неблагоприятные условия труда, особенно в период пуска и освоения ядерных объектов. Поэтому будут обобщены сведения по охране здоровья персонала по производству трития и его соединений.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института экологии растений и животных УрО РАН по теме «Изучение закономерностей миграции и биологического действия техногенных радионуклидов в пресноводных и наземных экосистемах в зонах воздействия предприятий атомного комплекса» № 122021000077-6 (разделы 2 и 5), а также при частичной финансовой поддержке Отраслевой программы Роспотребнадзора «Научные основы гормезиса биологических, физических и химических факторов среды обитания с обоснованием системы оценки рисков» (фундаментальные исследования) № 121090800090-4 (глава 1 раздела 3, главы 2 и 3 раздела 5), в рамках выполнения государственного задания ИГМ СО РАН (№ 122041400237-8) и при поддержке гранта РФФИ № 18-45-140020 «Особенности ядерного техногенеза на примере объекта мирного подземного ядерного взрыва “Кристалл”» и государственного заказа № 43 (76-08), 23 (105-12), Ф.2019.473808 в рамках программы «Обеспечение экологической безопасности, рационального природопользования и развитие лесного хозяйства Республики Саха (Якутия) на 2008–2012 годы», «Обеспечение экологической безопасности, рационального природопользования и развитие лесного хозяйства Республики Саха (Якутия) на 2018–2022 годы» (глава 2 раздела 3).

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АД — промышленный атомный двухцелевой реактор
АДЭ — атомный двухцелевой энергетический промышленный уранграфитовый реактор (ПУГР), заготовитель плутония
АН СССР — Академия наук Союза Советских Социалистических Республик
АЭС — атомная электростанция
ВВЭР — водо-водяной энергетический реактор
бланкет — специальная оболочка, окружающая плазму
ДНК — дезоксирибонуклеиновая кислота
ЖКТ — желудочно-кишечный тракт
ЖСР — жидко-солевые реакторы
ЗМПП — зондирование методом переходных процессов
ЗРТ — завод регенерации топлива
ИРМ — экспериментальный реактор
КПД — коэффициент полезного действия
МАГАТЭ — Международное агентство по атомной энергии (англ. — International Atomic Energy Agency, сокращённо — IAEA)
МДА — минимальная детектируемая активность
МДК — минимально детектируемая концентрация
МЭД — мощность экспозиционной дозы
НАО — низкоактивные нетехнологические отходы
НКДАР ООН — Научный комитет по действию атомной радиации (НКДАР) при Организации Объединенных Наций
НО РАО — ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами»
НТО — оксид трития (тритиевая вода)
ОР ДНК — односторонние разрывы дезоксирибонуклеиновой кислоты
ОСТ — органически связанный тритий
ПГЗ ЖРО — подземное захоронение жидких радиоактивных отходов
ПДП — предельно допустимое поступление
ПДУ — предельно допустимый уровень
ПРО — противоракетная оборона
ПЯВ — подземные ядерные взрывы
РБМК — реактор большой мощности канальный
РНК — рибонуклеиновая кислота
мтДНК — митохондриальная ДНК
САО — среднеактивные отходы
СИП (СИЯП) — Семипалатинский испытательный (ядерный) полигон
токамаки — тороидальные камеры с магнитными катушками
ТСВ — тритийсодержащая вода
ТХМ — тетрахлорметан
УрО РАН — Уральское отделение Российской академии наук
УТС — управляемый термоядерный синтез
ФАР — фотосинтетическая активная радиация

ФЯО ФГУП «Горно-химический комбинат» (ГХК) — федеральный ядерный оператор федеральное государственное унитарное предприятие «Горно-химический комбинат»

ЦГ — циклогексан

ЭМИ — электромагнитное излучение

ЯВУ — ядерное взрывное устройство

ЯВ — ядерный взрыв

BIOMASS — Biosphere Modelling and Assessment (триниевая рабочая группа)

BWR — корпусной кипящий реактор

DEMO — демонстрационная термоядерная энергетическая установка

EAST — Experimental Advanced Superconducting Tokamak

EPA — United States Environmental Protection Agency (Агентство по охране окружающей среды США)

FBR — реактор-размножитель на быстрых нейтронах

GCR — газоохлаждаемый реактор

ICRP — Международная комиссия по радиационной защите (МКРЗ/ICRP)

ITER — International Thermonuclear Experimental Reactor (Международный термоядерный энергетический реактор, ИТЭР)

LWGR — графитоводный реактор

MSBR — реактор с моножидкостным потоком соли

NSTX — National Spherical Torus eXperiment (сферический токамак, или сферомак)

PB-FHR — реактор с твёрдым шаровым топливом, высокотемпературный, теплоноситель FLiBe

PHWR — тяжеловодный реактор

PWR — водо-водяной ядерный реактор типа ВВЭР

Единицы измерения

Бк — беккерель

ГВт — 10^9 ватт

Гр — грей

Зв — зиверт

Ки — кюри

кт — килотонна

кэВ — 10^3 электрон-вольт

м. е. — массовая единица

мкР/ч — микрорентген в час

Мт — мегатонна

МэВ — 10^6 электрон-вольт

ТЕ — триниевая единица

эВ — электрон-вольт

Глава 1. История открытия дейтерия и трития

Как горючий (воспламеняемый) воздух водород известен довольно давно. Его получали действием кислот на металлы, наблюдали горение и взрывы гремучего газа Парацельс, Бойль, Лемери и другие ученые XVI–XVIII веков. С распространением теории флогистона некоторые химики пытались получить водород в качестве «свободного флогистона». В диссертации М. В. Ломоносова «О металлическом блеске» описано получение водорода действием «кислотных спиртов» (например, «соляного спирта», т. е. соляной кислоты) на железо и другие металлы. Русский учёный первым (1745) выдвинул гипотезу о том, что водород («горючий пар» — *varog inflammabilis*) представляет собой флогистон. Г. Кавендиш, подробно исследовавший свойства водорода, выдвинул подобную же гипотезу в 1766 г. Он называл водород «воспламеняемым воздухом», полученным из «металлов» (*Inflammable air from metals*), и полагал, как и все флогистики, что при растворении в кислотах металл теряет свой флогистон. А. Лавуазье, занимавшийся в 1779 г. исследованием состава воды путём её синтеза и разложения, назвал водород *Hydrogene* (водород), или *Hydrogene* (водород), от греч. ὕδωρ — вода и γεννάω — произвожу, рождаю.

Номенклатурная комиссия 1787 г. приняла словопроизводство *Hydrogene*. В «Таблице простых тел» Лавуазье водород (*Hydrogene*) упомянут в числе пяти (свет, теплота, кислород, азот, водород) «простых тел, относящихся ко всем трём царствам природы и которые следует рассматривать как элементы тел»; в качестве старых синонимов названия *Hydrogene* Лавуазье называет горючий газ (*Gaz inflammable*), основание горючего газа. В русской химической литературе конца XVIII и начала XIX веков встречаются два рода названий водорода — флогистические (горючий газ, горючий воздух, воспламеняемый воздух, загораемый воздух) и антифлогистические (водотвор, водотворное существо, водотворный гас, водородный гас, водород). Обе группы слов представляют собой переводы французских названий водорода (Петрянов-Соколов, 1965).

Первые опыты по обнаружению дейтерия осуществили американские учёные под руководством Г. Юри в 1931 г., в которых они провели фракционную перегонку 4 л жидкого водорода и выделили «тяжёлую» фракцию в объёме 1 мл. Спектральный анализ остатка указал на новые слабые линии, отсутствующие у обычного водорода, но соответствующие предварительному квантово-механическому расчёту их положения для нуклида ^2H . Выделение не составило особого труда методом электролиза воды, при котором лёгкий изотоп водорода выделяется быстрее, чем тяжёлый. В 1934 г. за открытие «тяжёлого» водорода Г. Юри получил Нобелевскую премию по химии.

Мировое производство дейтерия составляет десятки тысяч тонн в год. Основные методы получения: многоступенчатый электролиз воды, ректификация воды, ионный обмен, ректификация аммиака. При длительном кипячении природной воды концентрация тяжёлой воды в ней повышается. Среди населения бытует миф о том, что это якобы может вредно сказаться на здоровье, в действительности же повышение концентрации тяжёлой воды при кипячении

ничтожно (к тому же тяжёлая вода практически не ядовита); гораздо сильнее ощущается повышение концентрации растворённых солей.

Впервые предположение о возможном существовании изотопа водорода с массой 3 было высказано в 1933 г. Гильбертом, Льюисом и Франком, но не было подтверждено на опыте. Латинер и Юнг, исследуя растворы HCl и HBr в тяжёлой воде магнитооптическим методом, обнаружили наряду с двумя минимумами, относящимися к ^1H и ^2H , ещё один минимум, положение которого дало авторам повод приписать его изотопу водорода с массой 3. Однако этот метод оказался ошибочным, и результаты измерений этих исследователей нельзя считать достоверными.

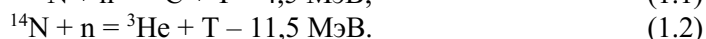
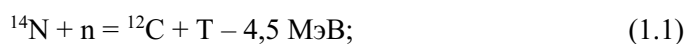
В 1934 г. М. Л. Олифант, П. Хартек и Э. Резерфорд опубликовали в журнале Nature заметку «Эффект трансмутации, полученный с тяжёлым водородом», в которой описывается метод получения третьего искусственного радиоактивного изотопа водорода — трития, содержание которого в лёгком водороде 1 атом из 10^{18} (для дейтерия 1 атом из $5 \cdot 10^3$). Эта концентрация впоследствии получила название «третиевая единица» (TE).

В 1935 г. предложена номенклатура изотопов водорода, согласно которой водород с массовым числом 3 называется тритий и обозначается символом $^3\text{H}_1$ или T. Тритий был получен предложенным впервые в истории методом ядерного синтеза путем взаимодействия дейтерированного хлорида аммония разогнанными в разрядной трубке до высоких энергий ионами D^+ : два атома дейтерия, сливаясь вместе, образовывали неустойчивое ядро гелия-4, которое затем распадалось с образованием трития и протона: $^4\text{He} = ^3\text{H} + ^1\text{H}$. Соавторами работы были молодой австралиец Марк Лоуренс Олифант и австриец Пауль Хартек. И если Олифант стал впоследствии академиком и директором Физического института Университета Канберры, то судьба Хартека сложилась иначе. Своеобразно понимая свой долг перед немецкой наукой, он в 1934 г. решил возвратиться в Германию и работать для нацистского режима. В 1939 г. он написал письмо в высшие военные инстанции Германии о возможности создания атомного оружия, а затем попытался построить урановый котёл, к счастью, безуспешно.

Со времени открытия трития было разработано и внедрено значительное количество методов его получения, например, при бомбардировке дейтронами и нейтронами мишеней из дейтерия, бора, бериллия, азота, лития и др. В промышленных масштабах — как в России, так и за рубежом — тритий получают в ядерном реакторе при облучении лития нейтронами.

Общий, непрерывно пополняющийся и расходуемый «запас» природного трития оценивается в пределах от $1,85 \cdot 10^{18}$ до $4,5 \cdot 10^{18}$ Бк, а его общее содержание в биосфере нашей планеты — в $6,5 \cdot 10^{18}$ Бк. Считается, что около 90 % природного трития содержится в гидросфере, 10 % — в стратосфере и 0,1 % — в тропосфере. При этом около 99 % трития, содержащегося в гидро- и стратосфере, находится в виде оксида трития (НТО).

Естественный тритий постоянно образуется в верхних слоях атмосферы под действием космического излучения (быстрых нейтронов, протонов, дейтронов). Так, нейтронная компонента космического излучения взаимодействует с азотом:



В процессе естественного обмена веществ, происходящего между внешней средой и живыми организмами, оксид трития включается в водный обмен, чем и обусловлено присутствие его в различных органах и тканях всех животных и растений. Считается, что в дождевых осадках содержание трития колеблется от 1 до 20 ТЕ, в реках — от 1 до 2 ТЕ, поверхностных водах Атлантики и Тихого океана — до 1 ТЕ, в винах — до 3 ТЕ.

В литосфере тритий образуется при взаимодействии нейтронов с ядрами легких изотопов лития по реакции:



Например, в минерале $\text{LiAl}(\text{SiO}_3)_2$ одят дочерний продукт распада трития ${}^3\text{He}$ в аномальных количествах.

По данным Ф. М. Лясс, Ю. М. Штуккенберг и др., общее содержание естественного трития во всём организме взрослого человека составляет до 500 Бк, причём среднее содержание в мягких тканях до 34 Бк, в костях до 2,4 Бк [Цит. по: Беловодский, 1985]. Указанное количество трития создаёт в мягких тканях дозу $4,5 \cdot 10^{-8}$ Зв в год. Удельный вклад трития в суммарную дозу внутреннего облучения мягких тканей и гонад от естественных нуклидов, содержащихся в организме человека, составляет 0,01 %.

До 1954 г. полагали, что запасы трития на Земле составляли до 2 кг природного трития ($1,8 \cdot 10^7$ Ки), из которых до 10 г находились в атмосфере, 13 г — в подземных водах, а остальное количество — в океанах. Однако, начиная с первого термоядерного взрыва (март 1954 г.) основным источником трития в атмосфере и гидросфере стали испытания термоядерного оружия, что привело к существенному его повышению содержания. При сопоставлении результатов исследований атмосферного воздуха и воды на содержание трития до и после испытаний термоядерного оружия было обнаружено увеличение концентрации нуклида в атмосфере и природных водах в 10–100 раз, а также рост удельного вклада трития в суммарной дозе естественного облучения человека. Считают, что в 1970-е гг. общее количество трития в окружающей среде составило $1,7 \cdot 10^9$ Ки.

Большое количество трития было выброшено при проведении ядерных взрывов в мирных целях, а также в процессе регенерации отработавшего ядерного топлива. В связи с этим в рамках МАГАТЭ ведутся постоянные наблюдения за содержанием трития в атмосфере и водоёмах для выявления пространственных и временных закономерностей распределения этого радионуклида.

Глава 2. Свойства трития

2.1. Физико-химические свойства трития

Современные успехи широкого использования трития в науке и технике непрерывно связаны с исследованиями физико-химических свойств указанного нуклида.

Как мы отмечали ранее, тритий (Т, или ${}^3\text{H}$) является радиоактивным изотопом водорода (${}^1\text{H}$) с массовым числом 3, ядро которого состоит из одного

протона и двух нейтронов. Основные физические и радиохимические свойства трития [Окись трития, 1968; Эванс, 1970; Ленский, 1981; Беловодский и др., 1985] приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Основные физические и радиохимические свойства трития

Свойство	Значение	Свойство	Значение
Масса ядра	3,0168 м. е.	Пробег β -частиц в воздухе (20 °С)	4,5–6,0 мм
Средняя энергия связи частиц	2,71 МэВ	Пробег β -частиц в тканях	~1 мк
Период полураспада	12,26 года	Слой полной защиты воды и воздуха	6 мкм и 6 мл
Средняя энергия β -частиц	5,7 кэВ	Максимальный защитный слой	0,6 мг/см ²
Максимальная энергия β -частиц	18,591 кэВ	Мольный объём	18,6 см ³ /М
Энергия		Удельная радиоактивность	3,6·10 ¹⁴ Бк/г
распада	7,6·10 ¹⁷ эВ/(час·Ки)		9706 Ки/г
ионизации	${}^3\text{H}_2 + 13,55 \text{ эВ} = {}^3\text{H}^+ + e$	Энергия диссоциации	2,60 Ки/мл
			${}^3\text{H}_2 + 4,59 \text{ эВ} = 2 \text{ }^3\text{H}$

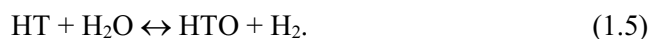
К характерной особенности трития относится способность его вступать в реакции изотопного обмена. В отличие от обычных химических реакций при замене одного изотопа другим (протия или дейтерия тритием) строение молекулы практически не меняется.

Реакции изотопного обмена:



протекают вследствие энерговыделения при радиоактивном распаде трития, при этом чем выше концентрация трития, тем быстрее реализуется обмен изотопов водорода. Это свойство широко используется для получения меченых органических соединений.

Другой важной реакцией изотопного обмена является водо-водородный обмен, в котором равновесие способствует переходу тяжёлых изотопов в водную фазу:



Приведённые данные очень важны при оценке поведения трития в производственных условиях.

К числу важнейших характеристик трития относится возможность окисления его в обычных условиях. В действительности, реакция между водородом и кислородом при обычной температуре (20 °С) и в отсутствие катализаторов практически не происходит. В то же время окисление трития при тех же условиях происходит в результате β -распада:



и



Имеются сведения [Беловодский, 1985] о том, что при концентрациях меньше $18 \cdot 10^{10}$ Бк/л превращение трития в НТО определяется окислением, а при концентрациях больше $18 \cdot 10^{10}$ Бк/л — изотопным обменом. По другим данным [Окись трития, 1968; Эванс, 1970], скорость изотопного обмена в 2,8 раза выше скорости окисления. Тот факт, что скорости превращения трития в НТО одинаковы как во влажном воздухе, так и в среде сухого аргона, полагают, что радиационное окисление является определяющим.

По большинству своих химических и физических свойств окись трития очень близка к дейтериевой и протиевой воде. Однако физические и термодинамические константы изотопных форм воды плавно изменяются с увеличением массы изотопной молекулы воды. Изменения степени ионизации, вязкости, подвижности иона, растворимости выражены при переходе от воды через HDO, D₂O, НТО и DTO к T₂O.

Некоторые свойства окислов трёх изотопов водорода [Окись трития, 1968; Jones, 1968; Эванс, 1970; Ленский, 1981] приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Свойства окислов изотопов водорода

Свойство	H ₂ O	D ₂ O	T ₂ O
Точка кипения, °С	100,00	101,42	101,52
Температура тройной точки, °С	0,01	3,82	4,49
Теплота парообразования при температуре кипения, кДж/моль	40,8	41,5	42,40
Энтропия при 298,16 К	16,75	18,90	19,00
Максимальная плотность, г/см ³	1,000	1,106	1,215
Максимальная температура при максимальной плотности, °С	3,98	11,24	13,40
Минимальный молярный объем, см ³ /моль	18,02	18,11	18,13

Радиоактивный распад трития сопровождается испусканием β-частиц и превращением его в гелий (⁴He₂). Некоторое время после открытия тритий считался стабильным изотопом, хотя его радиоактивность была теоретически предсказана Боннером в 1938 г. до экспериментального подтверждения его нестабильности.

В настоящее время в физических расчетах максимальную энергию β-распада трития принято считать 18,5 кЭв, хотя на долю излучения энергией выше 17 кЭв приходится лишь 5 %.

Несмотря на то, что от β-частиц трития защищает даже 6 мл слой воздуха, что они не проходят через лабораторную посуду и т. д., необходимо соблюдать жёсткие правила работы с этим элементом и его соединениями, как и с любым другим радиоактивным нуклидом.

2.2. Химические свойства трития и его основные соединения

По своим химическим свойствам тритий близок к элементу, изотопом которого он является, — водороду. Химические реакции с участием трития при обычных условиях (18–20 °С) протекает значительно медленнее, чем с обычным водородом (протием), в то же время если атом трития присоединится к какой-либо молекуле, то оторвать его от нее бывает довольно трудно. Вместе с тем газообразный тритий, в отличие от газообразного водорода, энергично реагирует со многими химически инертными маслами, смазками, каучуком. В ряде случаев газообразный тритий вступает в такие реакции изотопного обмена с атомами водорода органических молекул, которые с обычным водородом при одинаковых условиях совершенно не происходят [Окись трития, 1968; Jones, 1968; Эванс, 1970; Ленский, 1981].

Тритий образует прочные связи с углеродом в огромном большинстве органических соединений, которые не нарушаются при всевозможных химических и биологических превращениях. Необходимо отметить, что концентрированные соединения трития подвержены радиационному саморазложению под действием собственного излучения с разрывом связи между атомами водорода и углерода.

Тритий, по аналогии с водородом, вступает в химические реакции с кислородом, галогенами, серой, фосфором и другими металлоидами, а также взаимодействует с рядом металлов. В первом случае образуется оксид трития (сверхтяжёлая вода), во втором — водородистые соединения металлоидов, в третьем — тритиды (табл. 1.3).

Таблица 1.3

Физико-химические свойства гидридов (тритидов)

Параметр	Гидриды (тритиды)			
	LiH	TiH ₂	ZrH ₂	UH ₃
Тип гидрида	Солеобразный	Металлический		
Плотность, г/см ³	0,8160	3,9100	5,6700	10,9200
Объёмное содержание водорода, г/см ³	0,1015	0,1394	0,1181	0,1370
Удельная активность при замене H ₂ на T ₂ , 3,7·10 ¹⁰ Бк/г	2,91·10 ³	1,1·10 ³	6,0·10 ²	3,53·10 ²
Объём T ₂ , связанного с 1 г металла, см ³	1,6·10 ³	4,7·10 ²	2,5·10 ²	1,4·10 ²
Температура, при которой выделяется основное количество водорода, °С	750–850	400–700	500–900	300–400
Взаимодействие				
с атмосферным воздухом	Не устойчив, разлагается	Устойчив	Устойчив	Неустойчив, воспламеняется
с водой	То же	Устойчив до 100 °С	Устойчив до 100 °С	Неустойчив, загорается

Оксид трития. По своим физическим и химическим свойствам оксид трития близок к дейтериевой и протиевой воде (см. табл. 1.2) [Окись трития, 1968; Jones, 1968; Эванс, 1970; Ленский, 1981]. Тритиевую воду с высоким содержанием трития используют крайне редко в связи с её высокой удельной активностью и быстрым разложением в результате радиолитического распада. Для различных экспериментов обычно употребляют тритийсодержащую воду с концентрацией трития около 1 %.

Тритиды. Из соединений трития с металлами в различных областях науки и техники наиболее широкое применение нашли тритид циркония (ZrT_2), лития (LiT), титана (TiT_2), урана (UT_3) и др. Основные физико-химические свойства тритидов ранее представлены в табл. 1.3 [Гидриды металлов, 1973; Ленский, 1981; Беловодский и др., 1985; Заурбекова и др., 2018].

Глава 3. Производство трития. Объекты исследования

В течение тысячелетий содержание трития в природе было почти постоянным: непрерывное его образование в атмосфере компенсировалось естественным распадом. Однако с 1954 г. (начало испытаний термоядерных бомб) положение резко изменилось: в дождевой воде содержание трития увеличилось в тысячи раз. В 1970-х гг. из-за ядерных испытаний активность трития на земном шаре во много раз превышала активность естественного трития и составляла примерно 10^{20} Бк. Это привело к тому, что в Северном полушарии объёмная активность трития, например в дождевой воде, в 1973 г. составляла 55 Бк/л. В водоёмах Северного полушария объёмная активность трития была от 10 до 200 Бк/л. Тритий легко окисляется, поэтому на Земле он присутствует в основном в виде воды в водоёмах. В атмосфере тритий содержится в количестве не более 0,1 % общего запаса трития на земном шаре и представлен как газообразным тритием, так и парами тритиевой воды. После прекращения массовых ядерных испытаний его содержание в атмосфере снизилось, уменьшилась и его объёмная активность в водоёмах и приземной атмосфере. В настоящее время объёмная активность глобального трития, то есть связанного с ядерными испытаниями, в пресноводных водоёмах составляет от 5 до 175 Бк/л.

3.1. Атомные станции

В последние годы основным источником техногенного трития в окружающей среде стали атомные электростанции, которые ежегодно выделяют несколько десятков килограммов трития. При работе АЭС тритий образуется в реакторах при делении ^{235}U и в результате (n, γ)-, (n, α)-, (n, p)- и (n, T)-реакций на ядрах элементов конструкционных и других материалов активной зоны, а также в стержнях регулирования. При вводе в эксплуатацию новых реакторов АЭС, продолжении работ на предприятиях ЯТЦ потенциальная опасность облучения населения за счёт трития будет возрастать. Если в настоящее время эффективная эквивалентная доза, обусловленная тритием, не превышает в среднем на одного человека 0,05 % от естественного фона, то с увеличением числа работающих реакторов во всех странах через 65 лет она может достигнуть 1 %. Нарботка трития на АЭС к 2000 г. составляла приблизительно 10^{18} Бк [Егоров, 2002]. При сегодняшних темпах строительства АЭС в мире такое же количество трития будет наработано на АЭС в 2020–2025 гг. [Corcoran et al., 2017].

Уже сейчас необходимо предусматривать на действующих или строящихся ядерных объектах создание систем детритизации газовых сбросов, которые предназначены для аварийных ситуаций или проведения ремонтных работ.

При работе АЭС тритий образуется в реакторах:

- как продукт тройного деления ядер горючего (при делении ядер ^{235}U на 1 ГВт электрической мощности в реакторе образуется $1,15 \cdot 10^{11}$ Бк/сут трития);
- в результате (n, γ)-реакции на ядрах дейтерия, который находится в теплоносителе-воде;
- при захвате нейтронов ядрами В и Li, находящихся в теплоносителе-воде (при борном регулировании, коррекции водного режима — на АЭС с ВВЭР) и в стержнях регулирования;
- в результате реакции ^3He (n, p)T в газовом контуре (в газе, заполняющем графитовую кладку) АЭС с РБМК;
- в результате (n, T)- и (n, p)-реакций быстрых нейтронов на ядрах ^{14}N , ^6Li , ^{10}B , ^{40}Ca и др., присутствующих в различных материалах, используемых в конструкции реактора.

Часть реакций образования трития протекает в реакторной воде (в воде первого контура АЭС с ВВЭР, в воде и пароводяной смеси контура многократной принудительной циркуляции АЭС с РБМК), часть — в твэлах и стержнях регулирования. Из твэлов и стержней регулирования тритий попадает в реакторную воду при нарушении герметичности оболочек твэлов или стержней регулирования, а также вследствие диффузии через оболочки либо утечки через неплотность оболочек.

Большой разницы между активностью трития в выбросах АЭС с ВВЭР и РБМК одинаковой мощности нет. Мощность выброса трития — порядка 10^8 Бк/сут с двух энергоблоков. При такой объёмной активности трития в приземной атмосфере дозовая нагрузка на индивидуума из населения (верхняя оценка) составит не более 10 Зв/год.

Большая часть трития, наработанного на атомной станции, покидает её с жидкими стоками. Содержание трития в жидких стоках при штатной работе АЭС намного превосходит таковое всех остальных нуклидов, а в газообразных выбросах количество трития уступает только количеству радиоактивных благородных газов (табл. 1.4).

Таблица 1.4

Поступление трития в окружающую среду
с газообразными и жидкими отходами АЭС, Ки/МВт (эл.)/год
(Фомин Г. В., ГНЦ РФ Институт биофизики)

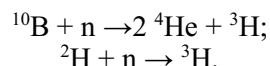
Тип реактора	Выброс в атмосферу	Сброс в гидросферу
ВВЭР	0,2–0,9	0,9
РБМК	0,6	0,04
PWR	0,22	1,4
BWR	0,14	0,1

Тритий обладает большим периодом полураспада (12,4 лет) и вследствие этого является глобальным загрязнителем природных комплексов. Загрязнение тритием грунтовых вод характерно для большинства АЭС. Контакт воды с РАО

в ёмкостях хранилищ ТРО приводит к образованию жидких тритиевых отходов. Тритий выходит за пределы хранилищ твердых радиоактивных отходов и обнаруживается в воде контрольных скважин санитарно-защитной зоны предприятия.

Тритий в жидкосольевых реакторах [Проблема накопления..., 2020].

В ядерных реакторах тритий образуется в результате тройного деления (ядро раскалывается на три осколка, а не на два). Вероятность такого события — приблизительно 1 на 10 тысяч реакций деления. В легководных реакторах тритий в основном накапливается в топливе. Другие реакции, ведущие к образованию трития, таковы: при захвате нейтрона на изотопе ^{10}B может пройти реакция с выходом 2 α -частиц и ядра трития. В тяжеловодных реакторах дополнительным источником трития служит захват нейтрона ядром дейтерия:



В ЖСР появятся новые источники образования трития — литий и бериллий.

Тритий может нарабатываться в результате захватов нейтронов на ядрах шестого и седьмого изотопов лития ^6Li и ^7Li . У изотопа ^9Be есть реакция (n,T), а также реакция с расколом ядра на изотопы ^4He и ^6He , причём последний распадается с периодом менее секунды и переходит в ^6Li , на котором может идти реакция с образованием трития.

В табл. 1.5 приведены оценки накопления трития (Ки/ГВт(э)/год) в легко- и тяжеловодных реакторах и в двух проектах жидкосольевых реакторов MSBR и PB-FHR. Из таблицы следует, что жидкосольевые реакторы с литием и/или бериллием будут накапливать тритий в количествах, значительно превосходящих объёмы производства трития в реакторах с легководным охлаждением. Этот тритий будет производиться в соли, а не в защищённой оболочке топливной матрице.

Таблица 1.5

Оценки накопления трития (Ки/ГВт (э)/год)
в легко- и тяжеловодных реакторах и в двух проектах
жидкосольевых реакторов MSBR и PB-FHR [Проблема накопления..., 2020]

Тип реактора	Скорость производства трития (Ки/ГВт/год)*			
	Топливо	Охладитель	Модератор	Контрольные элементы
PWR	11000–25000	300–1000		1000
BWR	11000–25000	**		3000–5000
HWR	14000–20000	50000	600000–2400000	1000
MSBR	730000		**	**
PB-FHR	**	**	**	**

Примечание. Реактор MSBR — мощность 1000 МВт(э), теплоноситель FLiBe. Реактор PB-FHR — твёрдое шаровое топливо, высокотемпературный, теплоноситель FLiBe.

* Единицы кюри трития, произведённого на ГВт в течение года.

** Отрицательное или неизвестное.

Образующийся в ЖСР тритий присутствует в соли в различных химических формах. Особое внимание следует обратить на фторид трития TF и на молекулярные соединения HT и T₂ (рис. 1.1).

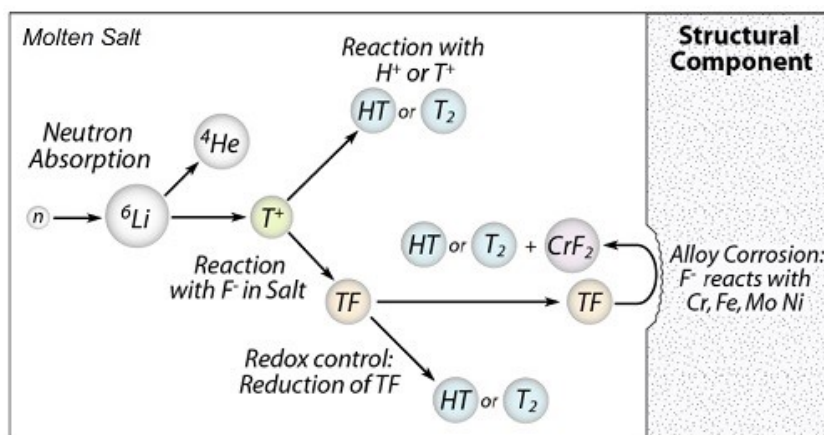


Рис. 1.1. Химические формы трития, присутствующего в соли (<http://www.atominfo.ru/newsz02/a0128.htm>)

Фторид трития — наиболее вероятная форма присутствия трития в соли после его образования в реакциях на ⁶Li. У неё низкая проницаемость сквозь конструкционные материалы. В то же время фторид трития — мощный окислитель, несущий основную ответственность за коррозию в ЖСР.

В отличие от легководных, в жидкосолевых реакторах продукты коррозии растворяются в теплоносителе, освобождая окислителем путь к более глубоким слоям металла. Поэтому в ЖСР необходимо предпринимать меры по восстановлению TF до того момента, когда он сможет провзаимодействовать с конструкционными материалами.

Для жидкосолевых реакторов разработаны различные варианты окислительно-восстановительного контроля, но все они в конечном итоге восстанавливают TF до молекулярного HT/T₂.

Молекулярный HT/T₂ при рабочих температурах ЖСР обладает высокой проницаемостью через конструкционные материалы, тем самым повышается вероятность выхода трития из реакторной установки. Таким образом, борьба с коррозией в ЖСР на фторидах чревата увеличением выбросов трития.

Молекулярный HT/T₂ при рабочих температурах ЖСР обладает высокой проницаемостью через конструкционные материалы, тем самым повышая вероятность выхода трития из реакторной установки.

Барьеры

Полученный на исследовательском реакторе MSRE опыт выявил высокую способность графитовой активной зоны удерживать тритий. Большая удельная поверхность графита обеспечивает наличие множества участков для «приклеивания» трития.

Известно, что тритий может высвободиться из графита при высоких температурах, превышающих те, что характерны для нормальной эксплуатации (рис. 1.2).

На способность графита удерживать тритий влияют различные факторы, такие как его форма и история облучения. При прочих равных реакторный графит удерживает тритий хуже, чем активированные формы углерода, так как он требует отжига для обеспечения его стабильности в активной зоне.

Управление

Один из способов управления тритием в жидкосолевых реакторах — использование покрытий с низкой проницаемостью для водорода (трития). Сложность заключается в том, что большинство известных антритриевых покрытий несовместимы с жидкими солями. В частности, это относится к оксидным и алюминиевым покрытиям. Не исключено, что конструкторам придётся размещать антритриевые покрытия (или барьеры) в местах, где нет физического контакта с жидкими солями (рис. 1.3).

Ещё одно конструкторское решение, способное помочь удалению трития, таково. В реакторной установке возможно организовать участки для выхода трития путём применения комбинации материалов с высокой и низкой проницаемостью. Для удаления трития возможно организовать контур, заполненный газом при низком давлении (см. левую часть рис. 1.4 — газ выносит тритий, попадающий в газовый контур через материал с высокой проницаемостью). Другой вариант — интегрировать систему удаления трития в двухстенный теплообменник (см. правую часть рис. 1.4).

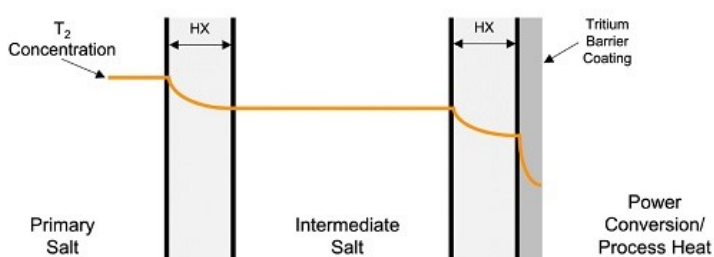


Рис. 1.3. Вариант размещения антритриевого барьера (<http://www.atominfo.ru/newsz02/a0128.htm>)

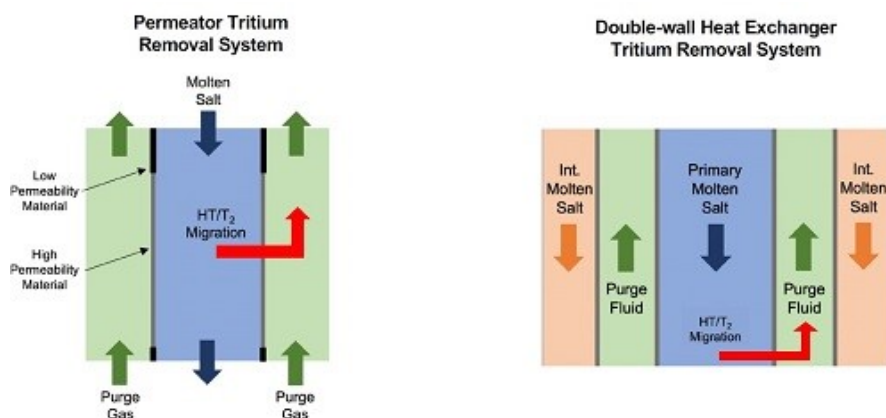


Рис. 1.4. Варианты организации потока трития (<http://www.atominfo.ru/newsz02/a0128.htm>)

Следующий возможный метод — барботаж (рис. 1.5). Пропускание инертного газа (например, гелия) через соль будет способствовать движению трития из соли в специально организованные газовые объёмы. Конкретные реализации будут зависеть от площади контакта соли и газового объёма. Наконец, возможно использование адсорберов. Схема одной из адсорбирующих установок приводится на рис. 1.6. В качестве адсорбирующего материала можно использовать, например, сферы из активированного угля. По мере насыщения сферы извлекаются и либо направляются на хранение, либо подвергаются нагреву для высвобождения трития, который в дальнейшем утилизируется тем или иным образом.

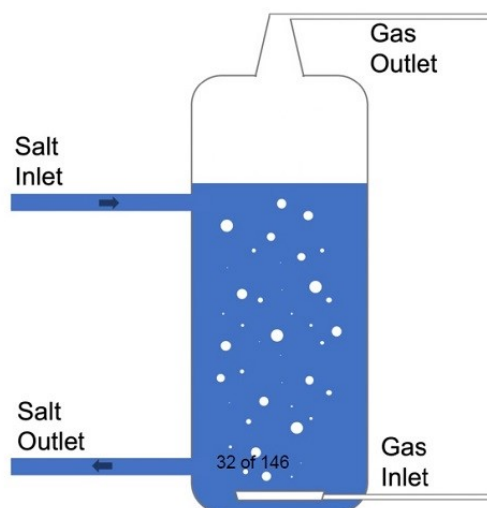


Рис. 1.5. Барботаж (<http://www.atominfo.ru/newsz02/a0128.htm>)

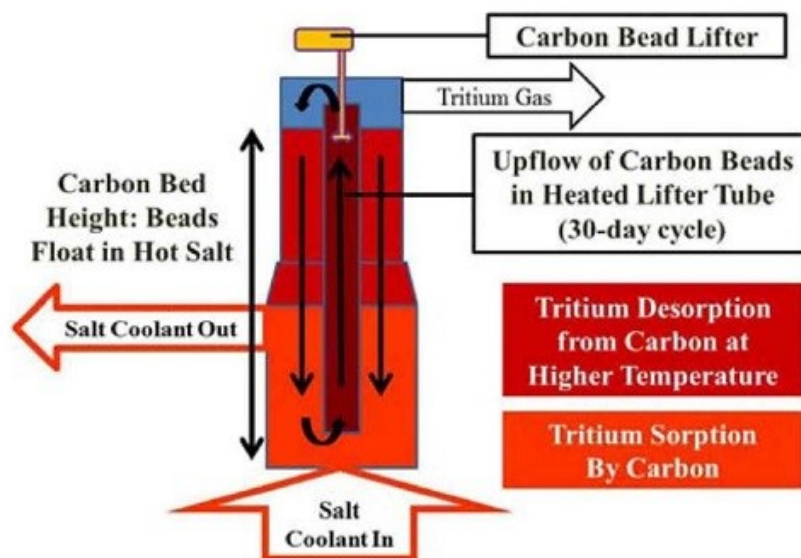


Рис. 1.6. Адсорбер (<http://www.atominfo.ru/newsz02/a0128.htm>)

поглощать избыточные нейтроны, что приводит к экономии нейтронов. Это позволяет реактору CANDU работать на необогащённом природном уране или уране, смешанном с другими материалами, такими как плутоний и торий. Реакторы CANDU используют на 30–40 % меньше урана, чем легководные реакторы, на единицу произведённой электроэнергии. Это главное преимущество тяжёлой конструкции. Реакторы CANDU генерируют тритий в теплоносителе и замедлителе из-за захвата нейтронов тяжёлым водородом. Многие специалисты считают, что одной из основных проблем для станций с реакторами CANDU является тритий. В 2007 г. Гринпис опубликовал критический анализ выбросов трития с канадских атомных электростанций, в частности, реактора типа CANDU в Ролфтоне, Онтарио. NPD произвёл первую в Канаде электроэнергию на АЭС и успешно работал с 1962 по 1987 гг.

Основным источником утечек трития в действующих конструкциях CANDU является тритий, образующийся в контуре охлаждающей жидкости. Сегодня в мире действует 31 реактор CANDU и 13 «производных от CANDU», разработанных на основе конструкции CANDU, в Индии.

В одном типичном тяжеловодном реакторе типа CANDU образуется около 130 г трития в год, а на 20 заводах по его получению в Дарлингтоне за период 1989–2011 гг. его общее производство составило 42,5 кг (409 МКи). Для предотвращения роста концентрации трития на тяжеловодных реакторах создаются установки детритизации, которые работают, например, в Канаде, Корее, Румынии и т. д.

Сбросы и выбросы трития с АЭС в окружающую среду не нормируются практически ни одной страной, развивающей ядерную энергетику (кроме стран, применяющих на АЭС тяжеловодные реакторы).

Основными производителями трития являются страны, эксплуатирующие тяжеловодные реакторы, в первую очередь Канада (завод в Дарлингтоне производит в среднем 1932 г/год (или 18,6 МКи/год) и Южная Корея (средняя производительность завода в Волсонге составляет 780 г/год, или 7,5 МКи/год), а в перспективе к наработке трития могут подключиться Индия и Румыния.

К 2050 г. глобальное содержание трития в окружающей среде может увеличиться примерно в 6 раз, при этом если современный средний уровень трития в воде составляет 10–20 Бк/л, а годовая доза от такой воды оценивается на уровне примерно $0,3 \cdot 10^{-3}$ мЗв/год, то к 2050 г. доза достигнет $2 \cdot 10^{-3}$ мЗв/год [Ивахнюк и др., 2015].

По данным Департамента энергетики США (U.S. Department of Energy) на 2008 г., концентрации трития в тяжеловодных реакторах могут достигать порядка 102 Ки/л, что на несколько порядков выше, чем характерные значения для легководных реакторных установок. Для американских тяжеловодных установок уровень трития в десятки раз ниже, чем для канадских. Нормативные пределы выбросов НТО в Канаде на несколько порядков превышают нормы для стран Европы. Например, в Германии установленный предел выбросов трития составляет 70 ТБк/год на каждый ядерный объект, а для реактора Брюс в Канаде — 826000 ТБк/год.

На рис. 1.8 графически представлено годовое поступление трития в атмосферу для 6 типов энергетических ядерных реакторов: PWR (водо-водяной ядерный реактор типа ВВЭР), BWR (корпусной кипящий реактор), PHWR (тяжеловодный реактор), GCR (газоохлаждаемый реактор), LWGR (графитоводный

реактор), FBR (реактор-размножитель на быстрых нейтронах). Основное поступление трития происходит за счёт работы тяжёловодных реакторных установок, а вклад всех остальных АЭС, включая и реакторы водо-водяного типа, производящие около 65 % электроэнергии, на порядки меньше.

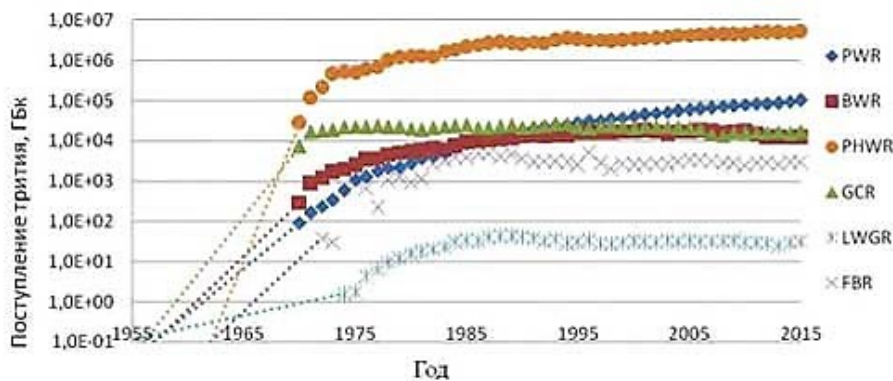
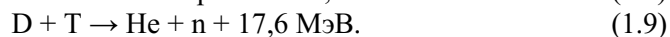
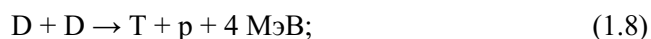


Рис. 1.8. Ежегодное поступление трития в атмосферу с выбросами АЭС для основных типов реакторов [Десятков, Екидин, 2018]

Суммарная активность трития, поступившего к 2015 г. в атмосферу за весь период эксплуатации АЭС, составила $6,48 \cdot 10^7$ ГБк, в том числе за счёт реакторов PWR — $9,16 \cdot 10^5$ ГБк, BWR — $2,31 \cdot 10^5$ ГБк, PHWR — $6,33 \cdot 10^7$ ГБк, GCR — $3,30 \cdot 10^5$ ГБк, LWGR — $4,99 \cdot 10^2$ ГБк и FBR — $4,75 \cdot 10^4$ ГБк.

3.2. Оружие

С момента открытия сверхтяжёлого изотопа водорода-трития прошло всего шесть лет, когда американский физик Э. Теллер в 1942 г. высказал мысль о возможности создания «супербомбы» путём слияния изотопов водорода. Эти реакции сопровождаются выделением колоссального количества энергии. Вскоре стало известно, что в США начались исследования по разработке такой бомбы, основанной на реакции синтеза ядер тяжёлых изотопов водорода — дейтерия (D) и трития (T):



Для возбуждения термоядерной реакции (реакции синтеза) и её поддержания нужна была температура в несколько десятков миллионов градусов, что было достижимо только при использовании взрыва ядерной бомбы, которой в то время не существовало.

Бомбардировка атомов В, Си, Fe дейтронами также приводит к образованию трития. В циклотроне тритий можно получить, бомбардируя бериллиевую мишень дейтронами:



После испытания первой атомной бомбы в СССР достаточно быстро прошёл шок у руководителей США, которые, основываясь на мнении

собственных экспертов, были уверены, что раньше 1950-х гг. создание и испытание в СССР атомного оружия абсолютно невозможно. Успехи одной страны неизбежно вызывали активное действие другой по созданию собственных аналогов, и если не в большом количестве, то в силе воздействия. В январе 1952 г. президент Г. Трумен объявил о своем решении начать полномасштабную деятельность по разработке супероружия — водородной бомбы. В соответствии с этим решением была начата реализация программы работ, составленной ещё в годы создания первой атомной бомбы в США. Впервые с докладом по проблеме создания отечественного термоядерного оружия выступил на заседании Спецкомитета 17 декабря 1945 г. профессор Я. Б. Зельдович. В нём излагались физические принципы действия более мощного, чем атомное, оружия. В водородной бомбе в качестве детонатора использовался атомный взрыв, который обеспечивал необходимую для начала реакции синтеза температуру не менее 20 000 000 °С, при которой происходит взаимодействие ядер дейтерия и трития и в результате мгновенного выделения внутриядерной энергии происходит взрыв.

Стратегический план разработки принципиально нового вида оружия был принят на совещании ведущих учёных Атомного проекта, организованном Б. Л. Ванниковым и И. В. Курчатовым 4–9 января 1949 г. в КБ-11 (ныне г. Саров). Кроме того, обсуждены направления научных исследований и определены предприятия по производству важнейших компонентов РДС-6 — так назвали первую водородную бомбу. Комбинату 817 (ПО «Маяк») поручалась разработка и освоение производства трития на небольшом опытно-промышленном реакторе. В этой связи начальник ПГУ Б. Л. Ванников своим приказом, в частности, дал следующие поручения: «1. Начальнику Второго Управления А. Д. Звереву и директору комбината 817 Б. Г. Музрукову построить на площадке № 1 комбината агрегат «АИ» для получения иттрия (следует понимать: трития. — *Ред.*) в количестве 100 условных единиц (следует понимать: граммов. — *Ред.*) и пустить его в эксплуатацию во втором квартале 1951 года. 2. Директору Ленгипростроя А. И. Гутову совместно с НИИхиммаш разработать технорабочий проект агрегата «АИ» к 15 августа с. г.» (<http://book.sarov.ru/wp-content/uploads/2017/12/INISM-14-3.pdf>).

Выбор места расположения реактора «АИ» диктовался возможностью использования инфраструктуры уже работавшего реактора «А», что значительно сокращало затраты и, самое главное, время на строительство.

Агрегат «АИ» занимает особое место в истории не только отечественного, но и мирового реакторостроения. Его создание преследовало две цели: проведение научных экспериментов и производство трития в промышленных масштабах. «АИ» отличался от других реакторов тем, что мог работать при значительно более высокой температуре графитовой кладки, доходившей до 500 °С, что стало возможным благодаря продувке ее азотом. Это требовало строительства рядом с объектом «АИ» воздуходелительных установок для получения газообразного азота. Возникшая в связи с этим возможность получения жидкого азота предопределила выбор метода очистки трития путём низкотемпературной ректификации, где жидкий азот используется как первичный хладагент процесса перевода газообразного водорода в жидкое состояние. Следует отметить, что к моменту принятия этого решения в лабораториях НИИ-9 (ВНИИНМ им. А.А. Бочвара. — *Ред.*) методами противоточной масс-

диффузии «вода — водород» и паровой ректификации жидкого аммиака впервые получены тритий и тяжёлая вода (окисленный дейтерий) высокой чистоты.

Принятый к промышленному использованию метод выделения трития низкотемпературной ректификацией жидких изотопов водорода оказался правильным. До настоящего времени химическое производство предприятия ПО «Маяк» эксплуатирует оборудование по технологии этого метода. Наряду с другими организациями решающую роль в разработке материалов и технологий для первого образца и последующих конструкций водородной бомбы сыграл коллектив НИИ-9. Главные усилия учёных концентрировались на разработке технологии получения трития из облучённых соединений лития. Для решения этой задачи организован химико-технологический отдел, научным руководителем которого стал профессор К. А. Большаков, заведующий кафедрой радиоактивных и рассеянных элементов Института тонкой химической технологии имени М.В. Ломоносова, а его заместителем — З. В. Ершова (<http://book.sarov.ru/wp-content/uploads/2017/12/ИИИМ-14-3.pdf>).

Все исследования по тритиевой проблеме начинались практически с нуля. Не было в нашей стране каких-либо научных и технологических разработок по тритию, тем не менее уже в 1951 г. в институте начала действовать опытная установка, производившая газообразный тритий кондиционной чистоты. Её созданию установки предшествовал комплекс научно-технических исследований. Были разработаны: химико-аналитические, спектральные и радиометрические методы анализа трития в газообразном и жидком состоянии; методы контроля состава парогазовой фазы, образующейся в изделии во время облучения; методы очистки трития от протия и химических примесей. Изучены процессы диффузии трития через конструкционные материалы при высокой температуре, и предложены способы снижения его выбросов в окружающую среду. И. В. Курчатов осуществлял еженедельный контроль этих исследований (<http://book.sarov.ru/wp-content/uploads/2017/12/ИИИМ-14-3.pdf>).

А. Д. Сахаров предложил гетерогенную конструкцию из чередующихся слоёв жидкого дейтерия и урана-238, названную им «слоистой». Автором идеи об использовании химических соединений дейтерия и трития является В. Л. Гинсбург, который предложил заменить тяжёлую воду (D₂O) на дейтерид лития-6. Это был важнейший момент на пути к созданию конструкции водородной бомбы. Применение дейтерида лития-6 обеспечивало протекание реакции:



при которой образовывался тритий, значительно повышающий энерговыделение термоядерных процессов. Как показали исследования, термоядерные реакции зависят от плотности изотопов водорода и лития. Требованиям высокой плотности смеси и отсутствия балластных примесей лучше всего удовлетворяет солеобразное соединение водорода с литием — дейтерид и тритид лития.

В 1950 г. А. Д. Сахаровым были подготовлены технические условия на конструирование водородной бомбы, определившие исходные данные на разработку в габарите атомной бомбы двух вариантов изделия. На преодоление пути от испытания ядерной (1949 г.) до водородной бомбы потребовалось четыре года (1953 г.).

Для практической реализации идей создания термоядерного оружия необходимо было разработать, построить и ввести в эксплуатацию такие же сложные производства, как и для создания атомной бомбы (получение урана-235 и плутония-239). Это, прежде всего, относилось к предприятиям по получению тяжёлых изотопов водорода (дейтерия и трития), добыче и обогащению естественного лития.

В природе литий состоит из изотопов ${}^7\text{Li}$ (92,58 %) и ${}^6\text{Li}$ (7,42 %). Так как из ${}^6\text{Li}$ нарабатывается тритий, в производстве в основном используются литиевые соединения, обогащённые ${}^6\text{Li}$. Значимость лития для изготовления термоядерного оружия так же велика, как урана для атомной бомбы, для получения плутония и для ядерной энергетики. В разработку технологии разделения изотопов лития основной вклад внес академик Б. П. Константинов — заведующий, а затем директор лаборатории ЛФТИ, с 1960 г. действительный член АН СССР, с 1966 г. вице-президент АН СССР. Под его руководством разработан метод разделения изотопов, который послужил основой для организации промышленного производства в широких масштабах. Производство литиевых блоков-поглотителей (ЛБП) длительное время находилось на единственном заводе 12 в г. Электросталь (<http://book.sarov.ru/wp-content/uploads/2017/12/INISM-14-3.pdf>).

В ядерных реакторах для наработки трития в качестве ядерного горючего используется не природный уран (${}^{238}\text{U}$), пригодный для наработки оружейного плутония-239, а обогащённые ураном-235 урановые блоки. Поскольку выход трития, получаемого путём облучения литиевых мишеней нейтронами, зависит от обогащения рабочих урановых блоков по делящемуся компоненту, то его содержание устанавливают от 21 до 90 %. Следует отметить, что накапливаемый в урановых блоках плутоний не годится для военных целей, поскольку при высокой степени выгорания содержит избыточное количество балластных изотопов элемента, в частности плутоний-240.

Одновременно с пуском реактора был организован заготовительный цех, в котором изготавливали прессованные брикеты и блок-мишени из лития (Li_2SO_4) для наработки первых партий трития. Это позволило в кратчайший срок создать производственные участки для выделения трития и изготовления продукции, необходимой для термоядерного оружия.

При термообработке облучённого сырья из Li_2SO_4 образовывалось значительное количество тритированных паров воды. Это усложняло технологический процесс получения товарного продукта и оказывало негативное влияние на радиационную обстановку на рабочих местах. Нужны были такие соединения лития, при обработке которых тритий выделялся бы в виде газообразного продукта. В результате всесторонних исследований вместо Li_2SO_4 был рекомендован литий-алюминиевый сплав, который после реакторных испытаний и проверки технологии извлечения трития был принят к внедрению.

Технология извлечения трития из облучённого в реакторе лития разрабатывалась в двух направлениях. Одно из них предусматривало извлечение трития непосредственно из технологических каналов реактора, загружённых литийсодержащими соединениями («трубный метод»). Эта схема вскоре была отвергнута как нетехнологичная. Второе (и основное) направление предполагало разработку технологии и пуск в эксплуатацию самостоятельного производства для выделения трития, очистки от примесей, разделение изотопов водорода и выдачу газа кондиционной чистоты и изотопного состава.

Полная технологическая схема* включала:

- просушку горячим азотом облучённых блочков для удаления с их поверхности сорбированной влаги;
- загрузку блоков в аппарат извлечения и повышение в нём температуры от 150 до 550 °С при непрерывной вакуумной откачке газовой фазы в газгольдер;
- удаление из водородо-гелиевой смеси примесей методом низкотемпературной ректификации;
- разделение изотопов водорода.

К концу 1952 г. были переработаны первые партии облучённых в реакторе герметичных алюминиевых блочков с сульфатом лития, а также извлечён, обогащён и получен первый промышленный тритий. В течение октября 1952 г. — июля 1953 г. было освоено производство трития, дейтерида лития, тритида-дейтерида лития и других тритиевых смесей.

Технология выделения трития из облучённых литиевых блоков и получения необходимых соединений для использования в термоядерном оружии в ряде случаев была драматичной. Это относилось к первым годам отработки технологии, когда наблюдались крайне неблагоприятные условия труда и регистрировались острые и хронические лучевые поражения персонала. Так, в начале 1953 г. в производстве газообразного трития произошла серьёзная авария на участке выделения трития из облучённых литиевых блоков-поглотителей. Аппаратчики и инженеры обнаружили сильный разогрев стенок аппарата обработки облучённых блоков. Расплавленный алюминий оболочек блоков провзаимодействовал с металлом стенок аппарата, произошло проплавление стенок, и содержимое аппарата было выброшено из технологической линии. Ценой этой аварии явилась гибель двух работников цеха. Таково было «знакомство» с тритием. Крайне неблагоприятной технологической операцией в первые годы являлось прокалывание облучённых блочков перед термообработкой. Это сопровождалось постоянным поступлением трития, пыли и аэрозоля облучённого сульфата лития в воздух рабочих помещений. Вскоре операция прокола блочков была исключена, что привело к значительному улучшению условий труда персонала. В дальнейшем технологический процесс получения трития и его соединений постоянно совершенствовался и соответственно улучшалась радиационная обстановка на рабочих местах**.

12 августа 1953 г. в 7 часов 30 минут на Семипалатинском полигоне было произведено испытание первого советского водородного заряда мощностью 400 кт. Советские ядерщики, в отличие от американцев, сразу проверяли образец заряда, который конструктивно мог быть оформлен в виде бомбы, транспортироваться бомбардировщиком. Впервые в гонке оружия массового поражения Советский Союз опередил Соединённые Штаты Америки, и немалую роль в этом сыграл коллектив комбината № 817. Указом Президиума Верховного Совета СССР 4 марта 1954 г. комбинат № 817 награжден орденом Ленина. Постановлением Правительства от 31 декабря 1953 г. звания лауреатов Сталинской премии удостоены учёные, конструкторы, руководители подразделений комбината, среди которых работники химического производства Э. Г. Алёнов, А. Н. Писарев и В. Т. Сомов. Успешные результаты испытания

* Ентяков Б. Н. Создание производства трития в СССР. 2017. URL: <http://book.sarov.ru/wp-content/uploads/2017/12/IHISM-14-3.pdf>.

** Там же.

водородной бомбы привели к увеличению объёма дальнейших исследований, увеличению мощности производства трития. Первое обоснование модернизации производства разработано доктором физико-математических наук Н. И. Павловым в 1953 г. Вследствие того, что радиационная ситуация на рабочих местах всех технологических переделов не соответствовала нормам безопасности, главное внимание уделялось вопросам повышения производительности и обеспечению нормальных условий труда, значительному снижению влияния на окружающую среду*.

Таким образом, США и СССР примерно одновременно (1954 и 1955 гг.) пришли к современному облику термоядерного оружия. Дальнейшее его развитие шло по пути совершенствования и специализации.

Таким образом, предприятия по получению трития и его соединений обязаны своим возникновением и развитием разработке термоядерного оружия. После создания этого оружия большие перспективы получили работы по овладению управляемым термоядерным синтезом. Российские ученые и специалисты активно занимаются созданием энергетического термоядерного реактора.

Если управляемая термоядерная реакция для получения электроэнергии пока является довольно далекой перспективой, то установки для этих целей с использованием термоядерного взрыва являются реальностью. К настоящему времени завершается разработка энергоустановок, где в качестве источника энергии используются периодически повторяющиеся термоядерные взрывы. В установках КВС (котёл взрывного сгорания) в качестве инициатора применяется уран-233, а основного топлива — изотопы водорода (дейтерий и тритий). Эти установки имеют большое преимущество по всем технико-экономическим показателям по сравнению с традиционными АЭС. Кроме того, уникальный изотоп водорода — тритий нашел широкое применение в различных областях науки и техники.

3.3. Общая характеристика объектов обследования

К настоящему времени накоплен большой опыт эксплуатации предприятий по получению трития и его соединений и проведён значительный объём исследований радиационно-гигиенической оценки, условий труда обслуживающего персонала. Вместе с тем обобщающих работ по указанным вопросам в доступной литературе практически нет. Приятным исключением из этого является монография Л. Ф. Беловодского, В. К. Гаевого и В. И. Гришмановского «Тритий» (1985). В ней авторы уделили, в частности, достаточное внимание вопросам обеспечения безопасных условий труда при работе с тритием и его соединениями. С гигиенической точки зрения высокой оценки заслуживают уникальные исследования авторов по поведению трития и его соединений в технологическом оборудовании и воздухе рабочих помещений, оценке путей поступления трития в организм персонала, мерам коллективной и индивидуальной защиты работников, а также дозиметрическому контролю при работе с нуклидом.

В известной нам литературе имеется незначительный перечень работ, непосредственно посвящённых изучению санитарно-гигиенических условий труда в производстве трития. В опубликованных исследованиях, касающихся

* Ентяков Б. Н. Создание производства трития в СССР. 2017

центров по производству трития в США, упоминаются лишь общие вопросы техники безопасности, организации дозиметрического контроля за содержанием трития в воздухе рабочих помещений и в организме персонала, а также некоторые частные меры защиты рабочих от поступления трития в организм работников [Санитарные правила работы..., 1960; Cohen, Kneip, 1973; Twenty years..., 1984; Экологические проблемы..., 2003; Data Base for Tritium..., 2003; Тритий и его соединения..., 2004; Determination of Total..., 2015; Исследования и разработки..., 2020].

По мере развития атомной промышленности и изучения биологического действия трития и его соединений изменялись нормы радиационной безопасности (табл. 1.6) и основные дозовые пределы облучения работников (табл. 1.7). Классы работ с тритием представлены в табл. 1.8.

Таблица 1.6

Эволюция норм радиационной безопасности по тритию
[Исследования и разработки..., 2020]

Радионуклид	Дозовый коэффициент, Зв/Бк	Предел годового поступления ППП перс.	Допустимая среднегодовая объемная активность, ДООА перс.
Тритий	–	–	$2,0 \cdot 10^{-8}$ Ки/л $7,4 \cdot 10^5$ Бк/м ³
Тритий-газ	–	$4,8 \cdot 10^5$ мкКи/год $1,78 \cdot 10^{10}$ Бк/год	$2,0 \cdot 10^{-6}$ Ки/л $7,4 \cdot 10^7$ Бк/м ³
НТО или T ₂ O	–	$1,2 \cdot 10^3$ мкКи/год $0,44 \cdot 10^8$ Бк/год	$4,8 \cdot 10^{-9}$ Ки/л $1,78 \cdot 10^7$ Бк/м ³
Газ НТО или T ₂ O	–	$4,8 \cdot 10^5$ мкКи/год $1,78 \cdot 10^{10}$ Бк/год	$2,0 \cdot 10^{-6}$ Ки/л $7,4 \cdot 10^7$ Бк/м ³
		$0,44 \cdot 10^8$ Бк/год	$4,8 \cdot 10^{-9}$ Ки/л $1,78 \cdot 10^5$ Бк/м ³
Оксид НТО, DTO, T ₂ O	–	$2,0 \cdot 10^4$ мкКи/год $7,4 \cdot 10^8$ Бк/год	$1,0 \cdot 10^{-8}$ Ки/л $3,7 \cdot 10^5$ Бк/м ³
Газ ТН, TD, T ₂		$1,5 \cdot 10^8$ мкКи/год $8,32 \cdot 10^{10}$ Бк/год	$6,0 \cdot 10^{-5}$ Ки/л $2,22 \cdot 10^9$ Бк/м ³
Пары тритированной воды НТО, DTO, T ₂ O	$1,8 \cdot 10^{-11}$	$1,1 \cdot 10^9$ Бк/год	$4,4 \cdot 10^5$ Бк/м ³
Газ ТН, TD, T ₂	$1,8 \cdot 10^{-15}$	$1,1 \cdot 10^{13}$ Бк/год	$4,4 \cdot 10^9$ Бк/м ³
Тритированный метан	$1,8 \cdot 10^{-13}$	$1,1 \cdot 10^{11}$ Бк/год	$4,4 \cdot 10^7$ Бк/м ³

Основываясь на физико-химических свойствах трития и его соединений, а также на особенностях их биологического действия, можем полагать, что ведущим фактором радиационного воздействия на персонал будет являться оксид трития. Это обстоятельство необходимо учитывать при организации безопасных условий работы с тритием.

Таблица 1.7

Эволюция основных дозовых пределов облучения для профессиональных работников в СССР/России [Исследования и разработки..., 2020]

Наименование, дата утверждения и номер документа	Дозовые пределы
«Общие санитарные нормы и правила по охране здоровья работающих на объектах А и Б» от 24.08.1948	0,1 Р/день (30 Р/год), при аварии 25 Р за 15 мин
«Временные общие санитарные нормы и правила по охране здоровья работающих с РВ» от 10.02.1950	30 Р/год, при аварии 25 Р за 15 мин

Окончание таблицы 1.7

Наименование, дата утверждения и номер документа	Дозовые пределы
«Санитарные нормы проектирования предприятия и лабораторий» от 11.04.1954	15 Р/год (0,05 Р/день), при аварии 25 Р за 15 мин
«Санитарные правила работы с РВ и ИИИ» от 25.06.1960	5 бэр/год (3 бэр/кв.), при ликвидации аварии — 25 бэр
«Нормы радиационной безопасности (НРБ-69)» от 25.08.1969	5 бэр/год (3 бэр/кв.), при ликвидации аварии — 25 бэр
«Нормы радиационной безопасности» (НРБ-76, НРБ-76/87) от 07.06.1976	5 бэр/год, при ликвидации аварии — 25 бэр
«Закон о радиационной безопасности населения» от 09.01.1996 № 3-ФЗ	0,02 Зв/год, средняя за 5 лет (макс. 0,05 Зв/год), при ликвидации аварии — 0,2 Зв
ГН 2.6.1.-054-96. Нормы радиационной безопасности (НРБ-96, НРБ-99/2009) от 19.04.1996	20 мЗв/год, средняя за 5 лет (макс. 50 мЗв/год), при ликвидации аварии — 200 мЗв

Таблица 1.8

Классы работ с тритием [Исследования и разработки..., 2020]

Класс работ	Суммарная активность трития и его соединений на рабочем месте, Бк (Ки)
I	Более 10^{14} ($2,67 \cdot 10^3$)
II	От 10^{11} до 10^{14} ($2,67-2,67 \cdot 10^3$)
III	От 10^9 до 10^{11} ($2,67 \cdot 10^{-2}-2,67$)

Глава 4. Применение трития в гражданских целях

Сравнительно большой период полураспада, малая энергия β -излучения, относительно высокая удельная активность, быстрое включение в обменные процессы поддерживают постоянно высокий спрос на тритий на рынке

радиоизотопной продукции. Тритий, наряду с использованием для термоядерного оружия, нашёл широкое применение в мирных целях, что вызывает большой интерес у производителей трития, 1 кг которого стоит до 30 млн долл. США (курс 2010 г.). В настоящей главе приведены разнообразные области науки и техники, в которых применяется этот изотоп.

4.1. Управляемый термоядерный синтез

В своём докладе на научной сессии, посвящённой 250-летию Академии наук СССР, ещё в 1975 г., академик П. Л. Капица сделал анализ наиболее употребительных видов энергии: электрической, тепловой, химической, механической и так называемой ядерной [Капица, 1976]. При этом он показал проблемы и ограничения, которые существовали на тот момент в развитии существующих источников энергопотребления. Основным сделанным им выводом не претерпел изменений за прошедшие 40 лет и заключается в том, что лучшим выходом из решения энергетической проблемы Земли нужно считать получение энергии путём термоядерного синтеза. Этот процесс в импульсном режиме осуществляется в водородной бомбе, но для мирного использования он должен быть замедлен до стационарного состояния.

Все трудности, которые возникают при использовании других видов энергии, будут отсутствовать, потому что термоядерный процесс не даёт в ощутимых количествах радиоактивных шлаков, не представляет большой опасности при аварии, не может быть использован для бомбы как взрывчатое вещество и не занимает большие территории суши. Наконец, запас дейтерия в природе, в океанах ещё больше, чем запас урана.

Существует четыре основных источника ядерной энергии. К настоящему времени доведено до промышленной реализации только два из них: энергия радиоактивного распада реализована в виде источников тока, а цепная реакция деления — в атомных реакторах. Третий, один из наиболее мощных источников ядерной энергии, — аннигиляция вещества и антивещества — пока не вышел из области научной фантастики, четвёртый — управляемый термоядерный синтез — находится в стадии интенсивной разработки. Этот источник по своему потенциалу уступает только аннигиляционным процессам и существенно превышает возможности ядерных реакций деления [Principles of fusion..., 2000].

Применение трития как участника термоядерных реакций возможно не только для изготовления «водородных» бомб: как и ядерные реакции, с успехом применённые в гражданских целях, так и термоядерные превращения могут быть использованы для получения практически неисчерпаемого количества энергии во благо человечества с перспективой освоения технологии управляемого термоядерного синтеза [Huguet, Bertolini, 1986; Sissing, Rossmassler, 1988; Тритиевый технологический..., 2000].

Исторически вопрос управляемого термоядерного синтеза на мировом уровне возник в 1956 г., когда И. В. Курчатов впервые высказал предложение о сотрудничестве учёных-атомщиков разных стран в решении этой научной проблемы при посещении Британского ядерного центра «Харуэлл». Впервые задачу по УТС в Советском Союзе сформулировал и предложил для неё конструктивное решение физик О. А. Лаврентьев. Кроме него важный вклад

в решение проблемы внесли такие выдающиеся физики, как А. Д. Сахаров, И. Е. Тамм и Л. А. Арцимович, с 1951 г. возглавлявший советскую программу по управляемому термоядерному синтезу.

В качестве топлива для будущих термоядерных электростанций будет использоваться смесь двух изотопов водорода — дейтерия и трития. Внутри реактора происходит столкновение и слияние ядер дейтерия и трития, что приводит к образованию гелия и высвобождению нейтронов (рис. 1.9).

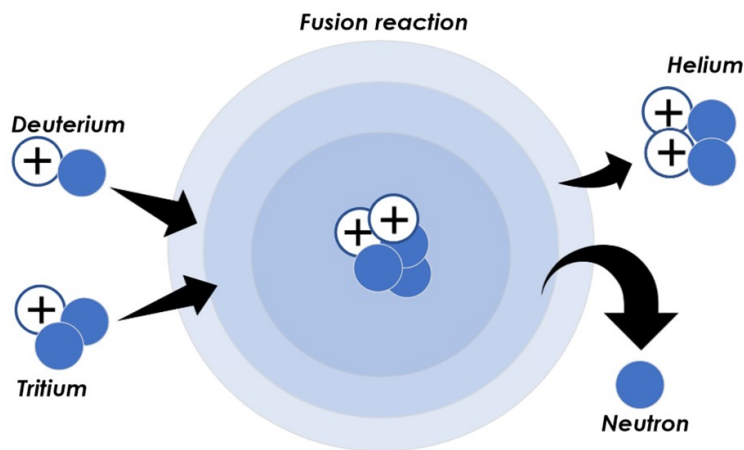


Рис. 1.9. Схема термоядерного синтеза (изображение: МАГАТЭ / М. Барбарино)
(<https://www.iaea.org/ru/energiya-termoyadernogo-sintez/cto-takoe-termoyadernyy-sintez-i-pochemu-ego-tak-slozhno-zapustit>)

Реакция синтеза заключается во взаимодействии двух или более атомных заряженных ядер под воздействием силы, с преобладанием кулоновского отталкивания и с формированием нового ядра при выделении колоссальной энергии. Атомные ядра, имеющие небольшой электрический заряд, проще привести в контакт на нужное расстояние, поэтому тяжёлые изотопы водорода являются одними из лучших видов топлива для реакции синтеза. Тем самым можно сказать, что почти все практически важные термоядерные реакции — это реакции слияния лёгких ядер в более тяжёлые.

Примерами термоядерных реакций являются:



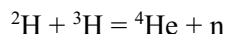
Сечения этих реакций (т. е. вероятность взаимодействия реагирующих) компонентов при энергии налетающей частицы менее 1 МэВ — 0,09, 0,16 и 5 барн соответственно. Реакция слияния ядер трития и дейтерия является наиболее перспективной для осуществления управляемого термоядерного синтеза, так как её сечение даже при низких энергиях достаточно велико, она обеспечивает удельную теплотворную способность $3,5 \cdot 10^{11}$ Дж/г.

Основная реакция $D + T = n + \alpha$ имеет наибольшее сечение ($\sigma_{\max} = 5$ барн в резонансе при энергии дейтронов $E_{\max} = 10^8$ кэВ), если сравнить с реакциями

$D + D = n + {}^3\text{He}$ ($\sigma_{\text{max}} = 0,105$ барн; $E_{\text{max}} = 1,9$ МэВ), $D + D = p + T$ ($\sigma_{\text{max}} = 0,09$ барн; $E_{\text{max}} = 2,0$ МэВ), а также с реакцией ${}^3\text{He} + D = p + \alpha$ ($\sigma_{\text{max}} = 0,7$ барн; $(E_D)_{\text{max}} = 0,4$ МэВ). В последней реакции выделяется 18,4 МэВ.

Установлено, что смесь двух изотопов — дейтерия и трития требует менее всего энергии для реакции синтеза по сравнению с энергией, выделяемой во время реакции. Однако хотя смесь дейтерия и трития (D-T) является предметом большинства исследований синтеза, она в любом случае не является единственным видом потенциального горючего. Другие смеси могут быть проще в производстве; их реакция может надёжнее контролироваться или, что более важно, производить меньше нейтронов. Особенный интерес вызывают так называемые «безнейтронные» реакции, поскольку успешное промышленное использование такого горючего будет означать отсутствие долговременного радиоактивного загрязнения материалов и конструкции реактора, что, в свою очередь, могло бы положительно повлиять на общественное мнение и на общую стоимость эксплуатации реактора, существенно уменьшив затраты на вывод из эксплуатации и утилизацию. Проблемой остается то, что реакцию синтеза с использованием альтернативных видов горючего намного сложнее поддерживать, потому D-T-реакция считается только первым необходимым шагом [Huguet, Bertolini, 1986; Sissing, Rossmassler, 1988; Тритиевый технологический..., 2000].

Самая легко осуществимая реакция



при энергетическом выходе 17,6 МэВ. Она наиболее легко осуществима с точки зрения современных технологий, даёт значительный выход энергии, топливные компоненты дешёвы. Недостаток — выход нежелательной нейтронной радиации. Существенно сложнее, на пределе возможного, можно осуществить реакцию D с редким и чрезвычайно дорогим изотопом гелия-3 при энергетическом выходе 18,4 МэВ. Гелий-3 в промышленных масштабах в настоящее время не производится, но может быть получен из трития. В настоящее время обсуждаются также фантастические проекты добычи гелия-3 на Луне. Сложность проведения термоядерной реакции можно характеризовать тройным произведением $\rho T \tau$ (плотность на температуру на время удержания). По этому параметру реакция D- ${}^3\text{He}$ примерно в 100 раз сложнее, чем D-T. Возможны и некоторые другие типы реакций. Выбор топлива зависит от множества факторов: его доступности и дешевизны, энергетического выхода, лёгкости достижения требуемых для реакции термоядерного синтеза условий (в первую очередь, температуры), необходимых конструктивных характеристик реактора и т. д.

Для осуществления УТС необходимо создать специальный термоядерный реактор — устройство для получения энергии за счёт реакций синтеза легких атомных ядер, происходящих в плазме при очень высоких температурах (выше 10^8 К). Основное требование, которому должен удовлетворять термоядерный реактор, заключается в том, чтобы энерговыделение в результате термоядерных реакций с избытком компенсировало затраты энергии от внешних источников на поддержание реакции.

Установки для УТС бывают двух типов [Huguet, Bertolini, 1986; Sissing, Rossmassler, 1988; Тритиевый технологический..., 2000]:

- квазистационарные системы (время существования плазмы $\tau \geq 1$ с, $n \geq 10^{14}$ см⁻³)
- импульсные системы ($\tau \approx 10^{-8}$ с, $n \geq 10^{22}$ см⁻³).

С тех пор, как в 1930-е гг. стало понятно, как работает термоядерный синтез, учёные не оставляют попыток воспроизвести и использовать его. Вначале эти попытки держались в секрете. Однако вскоре стало ясно, что такие сложные и дорогостоящие исследования возможно проводить только на основе сотрудничества. На Второй Международной конференции ООН по использованию атомной энергии в мирных целях (1958 г., Женева), учёные поведали миру об исследованиях в области термоядерного синтеза (<https://encyclopedia.mil.ru/encyclopedia/dictionary/details.htm?id=13205@morfDictionary>).

Ещё одна межправительственная организация в системе ООН — МАГАТЭ всегда была в авангарде международных термоядерных исследований. В 1960 г. агентство начало издавать журнал «Ядерный синтез» в целях обмена информацией о соответствующих достижениях, и сегодня он считается ведущим периодическим изданием в этой области. Первая международная конференция МАГАТЭ по энергии термоядерного синтеза состоялась в 1961 г., а с 1974 г. такое мероприятие проводится каждые два года, чтобы стимулировать обсуждение событий и достижений в этой сфере (<https://encyclopedia.mil.ru/encyclopedia/dictionary/details.htm?id=13205@morfDictionary>).

По итогам длившихся два десятилетия переговоров относительно конструкции и местонахождения крупнейшей в мире международной термоядерной установки в 2007 г. во Франции начали строительство Международного термоядерного энергетического реактора, который бы продемонстрировал научную и техническую возможность выработки термоядерной энергии. Депозитарием Соглашения ИТЭР [2007] является Генеральный директор МАГАТЭ. После ИТЭР планируется создание демонстрационных термоядерных энергетических установок, призванных показать, что УТС может генерировать нетто-электроэнергию. МАГАТЭ проводит семинары-практикумы по программе DEMO для облегчения сотрудничества в определении и координации регулярной деятельности во всём мире.

Ожидается, что термоядерный синтез сможет удовлетворять энергетические потребности человечества в течение миллионов лет. Термоядерное топливо имеется в избытке, и его легко получить: дейтерий с небольшими затратами можно добывать из морской воды, тритий можно производить из широко распространённого в природе лития. Выработка высокоактивных долгоживущих ядерных отходов термоядерными реакторами исключена, а аварии с расплавлением активной зоны термоядерного реактора практически невозможны.

Важно отметить, что в результате термоядерного синтеза в атмосферу не выбрасывается углекислый газ и другие парниковые газы. Вместе с АЭС, работа которых основана на принципе деления ядер и которые также являются низкоуглеродным источником энергии, в будущем термоядерные электростанции смогут внести вклад в смягчение последствий изменения климата.

Квазистационарные системы, в которых нагрев и удержание плазмы осуществляется магнитным полем при относительно низком давлении и высокой температуре: токамаки, стеллараторы (торсатроны) и зеркальные ловушки, которые отличаются конфигурацией магнитного поля. В настоящее время

с участием России создаётся Международный термоядерный энергетический реактор (ITER), который является квазистационарным и имеет конфигурацию токамака.

В *импульсных системах* управляемый термоядерный синтез осуществляется путем кратковременного нагрева небольших мишеней, содержащих дейтерий и тритий, сверхмощными лазерными лучами или пучками высокоэнергичных частиц (ионов, электронов). Такое облучение вызывает последовательность термоядерных микровзрывов.

Первый вид термоядерных реакторов с магнитным удержанием разработан намного лучше, и подобный реактор обычно имеет следующие узлы:

- 1) вакуумная камера в виде полого тороида или сферы;
- 2) стенки камеры, выполненные из конструкционного материала, способного обеспечить в камере поддержание высокого вакуума, радиационно- и термически стойкого. Поскольку стенка камеры подвергается мощной бомбардировке ионами и нейтральными частицами, облучению быстрыми нейтронами и γ -квантами, а иногда сгустками плазмы, то для противостояния этим неблагоприятным факторам внутренняя стенка камеры покрывается специальными материалами;
- 3) центральный соленоид, электрическое поле которого осуществляет пробой газа, регулирует нарастание тока и поддерживает его вместе со специальной системой дополнительного нагрева плазмы.

Термоядерный реактор (рис. 1.10) характеризуется коэффициентом усиления мощности, равным отношению тепловой мощности реактора к мощности затрат на её производство. Тепловая мощность реактора складывается из мощности: 1) выделяемой при термоядерной реакции в плазме; 2) вводимой в плазму для поддержания температуры горения термоядерной реакции или поддержания стационарного тока в плазме в случае токамака; 3) выделяющейся в *бланкете* — специальной оболочке, окружающей плазму.

В *бланкете* утилизируется энергия термоядерных нейтронов, она же служит защитой сверхпроводящих магнитных катушек от нейтронного и радиоактивного излучений. Короче говоря, в *бланкете* происходят термоядерные реакции, она же служит для утилизации энергии термоядерных нейтронов.

Как уже было сказано выше, *бланкет* со всех сторон охватывает кольцо плазмы и родившиеся при D-T-синтезе основные носители энергии — высокоэнергетические нейтроны (14-МэВ), что приводит к его чрезвычайному разогреву. Поэтому в *бланкете* помещают теплообменники, по которым пропускают воду. Полученный пар вращает паровую турбину, а она — ротор генератора (если реактор функционирует в составе термоядерной электростанции). Полоидальный дивертор служит для отвода тепла из плазмы в виде потока заряженных частиц и для откачки нейтрализованных на диверторных пластинах продуктов реакции — гелия и протия. Важная роль дивертора состоит в очистке плазмы от загрязняющих примесей, мешающих протеканию реакции синтеза.

Дивертор — совокупность устройств (специальные полоидальные магнитные катушки; контактирующие с плазмой панели — нейтрализаторы плазмы), с помощью которых область непосредственного контакта стенки с плазмой максимально удалена от основной горячей плазмы. В отсутствие

дивертора края диафрагм, обеспечивая границу между основной и периферийной плазмой, находятся в непосредственном контакте с горячей плазмой.

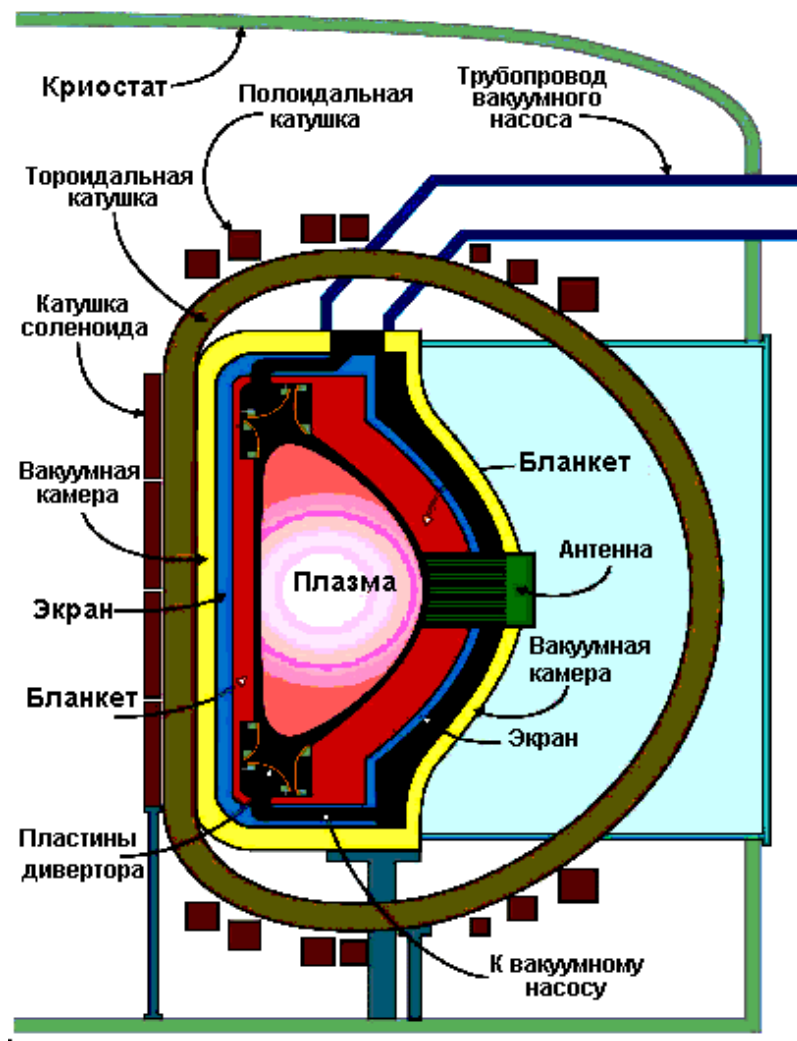


Рис. 1.10. Основные компоненты реактора для управляемого термоядерного синтеза

В термоядерных реакторах при полной тепловой мощности бланкета 1,5–5 ГВт будет производиться 0,03–0,05 г трития в сутки на 1 м² поверхности бланкета. Количество трития в бланкете зависит от его рабочей температуры (4500–5590 °С), верхняя граница температуры определяется совместимостью теплоносителя с конструкционными материалами (например, жидкий литий — сталь). Поэтому одним из сложных вопросов при создании столь сложного аппарата является поиск и создание конструкционных материалов, перечень которых приведён в табл. 1.9.

Во всех системах реактора полное количество трития (с учётом аварийного запаса) может составлять от 5 до 20 кг, а его радиоактивность — от $5 \cdot 10^5$

до $2 \cdot 10^6$ Ки (при допустимых выбросах в атмосферу от 1 до 3 Ки/сут). При максимальной аварии возможен выход от 1 до 10 % всего трития.

Таблица 1.9

Бридеры, проектируемые для реактора ИТЭР

Компонент реактора	Материалы
Охлаждаемый гелием керамический бридер	Be — размножитель Керамический бридер (Li_2TiO_3 , Li_4SiO_4 , Li_2O) He — охладитель и газ-носитель
Охлаждаемый водой керамический бридер	Be — размножитель Керамический бридер (Li_2TiO_3 , Li_2O) Вода — охладитель, He — газ-носитель
Охлаждаемый гелием расплав свинец-висмут	Расплавленный Pb- ^7Li — бридер/размножитель He — охладитель
Двойное охлаждение расплава свинец-висмут	SiC — проточные каналы, заполненные расплавом Pb- ^7Li — бридер/охладитель/размножитель He — охладитель
Самоохлаждаемый литий	Ванадиевый сплав Изолятор или барьер Литиевый бридер/охладитель
Охлаждаемый гелием расплав лития	Литиевый бридер He — охладитель
Свинец-литий керамический бридер	PbLi — размножитель/бридер/охладитель Двойное гелиевое охлаждение Двойной керамический бридер

Активность трития, содержащегося в бланкете термоядерного ДТ-реактора любого типа, — 10^6 Ки — следует сравнить с активностью топлива в энергетическом ядерном реакторе, проработавшем достаточно большое время (с большим выгоранием ^{235}U и накоплением ^{239}Pu). Во время аварии в Чернобыле суммарный выброс продуктов деления (без радиоактивных природных газов), по официальным данным, составил до $5 \cdot 10^7$ Ки, что соответствовало 3,5 % общего количества радионуклидов в реакторе 4-го блока АЭС на момент аварии.

Полагают, что в радиационном отношении термоядерный реактор намного безопаснее ядерного. Прежде всего стоит отметить, что количество находящихся в нем радиоактивных веществ сравнительно невелико. Энергия, которая может выделиться в результате какой-либо аварии, тоже мала и не может привести к разрушению реактора, при этом в его конструкции есть несколько естественных барьеров, препятствующих распространению радиоактивных веществ, например, вакуумная камера и оболочка криостата должны быть герметичными, иначе реактор просто не сможет работать. Тем не менее при проектировании ИТЭР большое внимание уделялось радиационной безопасности как при нормальной эксплуатации, так и во время возможных аварий.

Несмотря на то, что термоядерной энергетики не существует, в мире уже было построено около 300 токамаков. Наиболее крупные из них: реактор сегодняшнего дня Т-15 (Россия) со сверхпроводящим соленоидом, дающим поле напряженностью 3,6 Тл. В Европе находятся самый крупный в мире действующий

токамак Joint European Torus (Евратом в Великобритании) и один из крупнейших в мире Tore Supra со сверхпроводящими катушками (Кадараш, Франция). Сферический токамак (сферомак) NSTX и работающий с 1993 г. Alcator C-Mod с самым высоким магнитным полем и давлением плазмы в мире расположены в Соединённых Штатах. В Японском институте исследований атомной энергии с 1985 г. действует крупнейший токамак JT-60. EAST — экспериментальный усовершенствованный сверхпроводимый токамак принадлежит Институту физики плазмы Китайской академии наук (г. Хэфэй, провинция Аньхой). Он является глубокой модернизацией российского токамака НТ-7. Первые успешные испытания были проведены летом 2006 г., в 2007 г. на нём был проведён первый в мире «безубыточный» термоядерный синтез, с точки зрения соотношения затраченной/полученной энергии. В настоящее время это соотношение составляет 1:1,25, в ближайшем будущем планируется его довести до 1:50. Токамак существует и на Африканском континенте в Ливии (ТМ-4А).

Поскольку для разработки и создания столь сложного оборудования для термоядерного реактора требуются крупные финансовые инвестиции, а сама термоядерная энергетика на первых порах является затратной, был создан международный проект ITER (то же на лат. *iter* — путь). Задача этого проекта заключается в демонстрации возможности коммерческого использования термоядерного реактора и решении физических и технологических проблем, которые могут встречаться на этом пути. Первое предложение по созданию международной кооперации в области развития термоядерной энергетике было сделано СССР в 1985 г., и уже в 1988–1990 гг. советские, американские, японские и европейские учёные провели проработку проекта создания термоядерного реактора, получившего упомянутое название. В настоящее время в работу над проектом вошли учёные из Индии, Канады, Южной Кореи. Сооружения будут размещены на территории Исследовательского центра Кадараш (Франция), занимая в общей сложности площадь в 180 га, а сам токамак и все служебные помещения будут расположены на площадке длиной 1 км и шириной 0,4 км. В целом сооружения ITER будут представлять собой 60-метровое сооружение массой до 23 тыс. т.

На момент 2012 г. были закончены работы по созданию фундамента под реактор и возведение стен в котловане. Однако первоначальная стоимость строительства, составлявшая в 5 млрд евро, в ходе работы увеличилась более чем в два раза, а общая сумма создания термоядерного реактора выросла до 15 млрд евро, в связи с чем срок начала экспериментов передвинули с 2016 на 2020 г. Российская сторона за 2013–2015 гг. вложит в проект около 14 млрд руб., а Председателем Совета ИТЭР избран академик Е. П. Велихов.

Несмотря на большие расходы на создание термоядерного реактора, мировое сообщество идёт на них, поскольку решение проблемы управления термоядерных реакций позволит создать мощный и практически неиссякаемый источник энергии.

4.2. Применение в медицине и биологии

Одними из важных областей применения трития в мирных целях являются биология и медицина. В этих отраслях науки он используется для выяснения

характера и скорости различных совершающихся в организме животных и человека биохимических процессов, для определения исходных и конечных продуктов этих реакций, а также для перемещения и накопления органических веществ в органах и тканях. Чтобы решить упомянутые задачи, в начале 1960-х гг. возникла настоятельная необходимость в синтезе различных радиоактивно-меченных соединений, прежде всего соединений, меченных тритием. Для получения меченых органических соединений можно использовать различные изотопы: ^{11}C (период полураспада 20,3 мин), ^{14}C (5790 лет), ^{125}I (60,14 сут), ^{35}S (87,2 сут), ^{18}F (110 мин), ^{33}P (25,4 сут) и многие другие, однако до настоящего времени наиболее распространёнными мечеными биологически активными соединениями являются соединения, меченные тритием.

Большой интерес к ним обусловлен такими параметрами этого изотопа, как мягкое излучение, удобный для исследователя период полураспада (12, 26 лет), высокая молярная радиоактивность (58,24 Ки/М), а также рядом других причин: 1) возможностью получения препаратов с радиохимической чистотой до 97 %; 2) высокой чувствительностью определения степени связывания; 3) возможностью использования меченных тритием соединений при фармакокинетических исследованиях для определения органа-мишени, в котором преимущественно накапливается лекарственный препарат, или скоростью выведения этого препарата из живых организмов; 4) решением проблем метаболизма (изучение субстратной специфичности и поиском новых эффективных ингибиторов ферментов и т. д.). С помощью тритиевой метки в результате были изучены структура хромосом, синтез ДНК, кинетика деления клеток и многое другое.

Следует отметить, что направление, связанное с синтезом меченных тритием соединений, первым появилось в Радиобиологическом отделе Института атомной энергии имени И.В. Курчатова. В дальнейшем этот отдел был реорганизован в Институт молекулярной генетики РАН. По инициативе руководителя отдела В. Ю. Гаврилова в 1962 г. впервые была спроектирована и создана уникальная установка, позволяющая работать со значительным количеством газообразного трития и дающая возможность вводить тритиевую метку в физиологически активные вещества. Это позволило организовать впервые в СССР серийный выпуск меченных тритием препаратов. В настоящее время номенклатура меченных тритием физиологически активных веществ составляет более 250 наименований, что обеспечило потребности страны в этом виде изотопной продукции. При этом если в 1970-е гг. их основная часть относилась к компонентам нуклеиновых кислот, аминокислотам, простейшим витаминам и липидам, то конец XX века ознаменовался большим интересом к меченым тритием фармпрепаратам для исследования фармакокинетики и метаболизма. Улучшались и характеристики препаратов: в 1970-е гг. типичные молярные радиоактивности (МР) препаратов составляли 5–10 Ки/мМ, а радиохимическая чистота доходила до 95 %, в настоящее время МР (до 100 Ки/мМ и выше) соответствует полной замене нескольких атомов водорода на тритий.

Важно заметить, что стоимость 1 Ки газообразного трития на 2012 г. составляла от 2 до 3 долл. США, тогда как 1 мКи даже сравнительно простого и недорогого препарата — до 100 долл. США. Тем самым можно заключить, что в ходе синтеза меченных тритием соединений получают продукты, в сотни

тысяч раз более ценные, чем исходное сырье. Это говорит об экономически выгодном производстве упомянутых веществ.

Для изучения различных биохимических, диагностических и структурно-функциональных исследований макромолекул (белки, ДНК) широко используется *метод изотопного обмена*. Его основа состоит в том, что при растворении многих веществ в тритиевой воде (T_2O) происходит обмен атомов водорода на тритий (3H). Изотопный обмен характеризуется как самопроизвольное перераспределение изотопов химического элемента между различными фазами системы (в частности, между различными агрегатными состояниями одного и того же вещества), частицами (молекулами, ионами) или внутри молекул (сложных ионов). При изотопном обмене сохраняется неизменным элементный состав каждого участвующего в обмене вещества, изменяется лишь его изотопный состав. Распределение изотопов между веществами в состоянии равновесия характеризуется коэффициентом распределения, определяющим соотношение равновесных концентраций изотопов в реагирующих веществах. Следует отметить, что для тяжёлых изотопов (дейтерия и трития) распределение между реагирующими веществами происходит неравномерно и может достигать сотен процентов. Отклонение от равномерного распределения зависит не только от большого различия массы изотопов (в данном случае водорода и трития, различающейся в 3 раза), но и от химического состава веществ, между которыми происходит изотопный обмен. Кроме того, коэффициент распределения зависит от температуры и во всех случаях по мере её повышения приближается к 1. Скорость протекания изотопного обмена в растворе практически мгновенна, но в некоторых случаях крайне медленна или же обмена вовсе не происходит.

Так, при помещении молекулы в тяжёлую тритиевую воду происходит довольно быстрый изотопный (H-D-T)-обмен протонов на дейтерий/тритий в гидроксильных -OH, карбоксильных -COOH, сульфгидрильных -SH, аминогруппах -NH₂ и амидных -NH всех органических соединений (аминокислоты, нуклеозиды, короткие полипептиды, белки в конформации беспорядочного клубка и одноцепочечные нуклеиновые кислоты, липиды, белки и сахара). Напротив, связь C-H не подвергается изотопному обмену, поэтому соединения со связями типа C-D (C-T) синтезируются индивидуально. Нужно учесть, что скорость обмена изотопами зависит от участия атомов в образовании водородных связей: их участие снижает скорость изотопного обмена. Следовательно, измеряя скорость водородного обмена для протонов открытых групп (например, в мономерах) и скорость обмена для аналогичных групп макромолекулы, можем в данный момент времени определить долю протонов этих групп, не участвующих в образовании водородных связей, что и является результатом структурно-функциональных исследований соединений.

Следует отметить, что изотопные эффекты дейтерия и трития связаны с образованием в тяжёлой/тритиевой воде конформаций молекул с иными структурно-динамическими свойствами, чем конформаций, образованных с участием водорода и поэтому имеющих другую активность и биологические свойства. Например, разрыв C¹H-связей может происходить быстрее, чем C²H-связей, и подвижность дейтерия меньше, чем подвижность протия; константа ионизации тяжёлой воды меньше константы ионизации обычной воды.

При использовании метода тритиевого обмена были получены весьма важные результаты. Прежде всего, из данных по кинетике изотопного обмена и равновесному распределению изотопов, а также влиянию на них рН выяснено, что водородные связи в двухцепочечной ДНК постоянно разрушаются и вновь образуются. Этот процесс назвали «дыханием» и предположили, что он лежит в основе возможного механизма таких процессов, как инициация синтеза ДНК и спаривание ДНК-ДНК при генетической рекомбинации. Определение же числа водородных связей за счёт измерения доли быстро обмениваемых протонов помогло подтвердить структуру тРНК.

В изотопных исследованиях с тяжёлой и тритиевой водой часто используют метод изотопного разбавления, прежде всего для определения содержания тех или иных соединений в смеси, которые невозможно количественно выделить и разделить на отдельные компоненты. Например, метод изотопного разбавления может быть использован для определения общего количества воды в организме. Для этого вводят известное количество воды с определённым содержанием $H_2O:T_2O = n$. Через некоторое время, которое ушло на полное смешивание меченой воды с остальной ее частью, отбирают образец известного объёма сыворотки крови и измеряют в нем удельную активность трития. Величина коэффициента разбавления в образце (объём воды, введённой в эксперименте) позволяет рассчитать полное количество воды в организме.

Газообразный тритий используется в клинической практике для определения вентиляционного объёма легких, а также в фармакологических исследованиях и экспериментальной радиометрии.

4.3. Светосоставы постоянного действия

Перспективной областью использования β -излучения трития является получение *светосоставов постоянного действия* на основе тритий-органических соединений. Первоначально к люминофорам добавлялись естественные α -радиоактивные вещества, прежде всего радий, испускающий γ -лучи с энергией 0,188 МэВ, и α -частицы с энергией 4,777 МэВ. Название «радий» выбрано супругами Кюри не случайно (лат. *radius* — луч), поскольку сам металл, его соли и смеси солей радия с некоторыми веществами испускают хорошо различимый свет за счёт воздействия α -частиц. Таким образом, почти сразу после обнаружения радиoluminesценции сульфида цинка под действием излучения радия (А. Беккерель) в 1902 г. была создана светящаяся краска (У. Хаммер), грамм которой содержал от 10 до 300 мкг радия, пошедшая на изготовление наручных часов со светящимся в темноте циферблатом. Следует отметить, что их производство прекратилось лишь в начале 1960-х гг., а произведено было несколько миллионов часов. Кроме радия, предпринимались попытки применения ^{85}K в баллонах, покрытых люминофором изнутри, но в настоящее время в таких люминофорах используются только тритий.

Преимущество подсветки на основе тритиевого газа заключается в том, что она не тускнеет в течение длительного промежутка времени (около 10 лет) использования в темноте, далее потеря в яркости составит не более 40 %. В общей сложности эта подсветка работает до 25 лет. В отличие от радия, тритий является

мягким β -излучателем, излучение которого задерживается даже тонким стеклом часов; β -частицы трития с энергией до 18 кэВ имеют длину максимального пробега в воздухе 5–6 мм, то есть практически полностью задерживаются стеклом толщиной 1–2 мм. Кроме того, период полураспада трития гораздо меньше (12,33 года) периода полураспада радия, то есть после случайного попадания краски в окружающую среду они распадаются быстрее и причиняют меньше вреда экологии (а тритий применяется в виде газа и в случае разрушения источника света сразу же сильно разбавляется воздухом).

Чтобы получить источник света, газообразный тритий запаивают в стеклянный сосуд малого объёма. Внутреннюю поверхность этой ёмкости покрывают люминесцентным веществом. Электроны, испускаемые тритием, бомбардируют слой люминофора, активируя его молекулы, которые начинают светиться. Цвет свечения зависит от химического состава люминофора. Популярность тритиевой подсветки обеспечивается тем, что она не требует внешних источников энергии, то есть прибор с такой подсветкой остаётся автономным на протяжении всего времени жизни источника света и не отключится, если в нём по какой-либо причине сядет батарейка. Современные часы, как правило армейские, экранированы от воздействия магнитного поля, не подвержены коррозии, не запотевают, выдерживают давление, эквивалентное подъёму на 10-километровую высоту, то есть не могут спровоцировать детонацию мины. Источники света в указанных выше часах представляют собой надёжно запечатанные стеклянные цилиндры размером 1,3×0,5 мм, внутри которых содержится газообразный тритий. Максимальный срок службы тритиевых источников света — 20 лет.

Именно поэтому тритиевые технологии охотно применяют в приборах военного назначения, в том числе для подсветки циферблатов и других значимых элементов в самых разнообразных приборах, это в первую очередь *компасы*, стрелки которых подсвечивали с помощью тритийсодержащей фосфоресцентной краски. Тритиевые элементы работают в оптических, коллиматорных и блочных прицелах. Производятся прицелы с подсвечиваемой прицельной маркой, они не нуждаются во внешних источниках тока, их особенность заключается в использовании волоконной оптики и в наличии баллистической прицельной сетки. Для подсветки используется тритиевая лампа, время непрерывной работы её доходит до 12–15 лет.

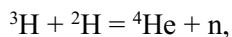
Ещё одним примером использования трития в гражданских целях является производство осветителей. Осветитель представляет собой заполненный газообразным тритием металлический корпус, дно которого покрыто слоем люминофора на основе ZnS:Cu. Напротив имеющегося окна расположен зеркальный конический отражатель длиной не менее 2,5 диаметра, а образующая расположена под углом к оси полости, составляющим от 18° до 22°.

4.4. Тритиевые источники нейтронов, низкоэнергетического рентгеновского излучения

Тритиевые мишени (газообразные, твёрдые — на основе титана, циркония, лития, неодима, празеодима и др.) широко используются в ускорителях

и нейтронных генераторах для получения нейтронов высоких энергий, для газожидкостной хроматографии, в качестве радиоактивных источников ЭМИ, для флюорографии и измерения толщины тонких плёнок.

Наиболее широкое применение в ядерно-физических исследованиях нашли нейтронные источники. В генераторах нейтронов используется реакция:



протекающая при бомбардировке дейтронами мишени, насыщенной тритием. Эта реакция может протекать даже при очень малых энергиях дейтронов (до 0,109 МэВ) за счёт ее высокого значения сечения (> 4 барн).

Портативный источник нейтронов представляет собой миниатюрный ускоритель, запаянный в камеру, в которой расположены источник ионов, система ускоряющих электронов, мишень и устройство для поддержания необходимого давления газа. В качестве мишени используют тритиды урана, титана или циркония, а также насыщенные тритием титано-молибденовые сплавы. Разработанные генераторы позволяют получить непрерывные потоки быстрых (до 14 МэВ) нейтронов до 10^{10} нейтр/с, а также импульсные потоки до 10^{13} нейтр/с в импульсе 10 мкс и частоте следования до 100 Гц. Генераторы нейтронов успешно применяются в ядерной геофизике для целей элементного анализа состава вещества, для определения различных примесей в металлах, для дефектоскопии и т. д.

Тритий-титановые и тритий-циркониевые мишени получили широкое применение для получения моноэнергетических нейтронов на электростатических ускорителях протонов с энергией падающего пучка до 4 МэВ.

Тормозное излучение тритиевых мишеней может быть использовано для источников ЭМИ малой энергии для флюорографии, калибровки сверхтонких материалов. Другой областью использования упомянутых источников является определение серы в нефти и в других углеводородах.

4.5. Другие способы применения трития

Интересные возможности трития связаны со способностью β -излучения ионизировать или возбуждать атомы и молекулы различных веществ. К примеру, излучение от источников трития от $3,7 \cdot 10^{11}$ до $5,5 \cdot 10^{11}$ Бк применяется для ионизации воздуха в установках для снятия электростатических зарядов.

Большое значение и многочисленное применение имеет тритий в физике, химии, металлургии, гидрологии и других отраслях хозяйства. Так, в физике он используется для изготовления тритиевых мишеней и микромишеней для лазерного термоядерного синтеза.

Заканчивая изложение сведений об использовании трития в отдельных отраслях науки и техники, считаем необходимым подчеркнуть, что мы остановились лишь вкратце на затронутом вопросе. Вместе с тем отметим, что приведённых данных вполне достаточно для суждения о характере, объёме и перспективах применения трития в науке и технике. Изложенные особенности радиоактивных и химических свойств трития, безусловно, открывают большие перспективы для производства и широкого использования его самого и его соединений.

Глава 5. Тритий в ядерно-оружейном комплексе

5.1. Общее описание и устройство термоядерного боеприпаса

Термоядерное оружие (водородная бомба) — тип ядерного оружия, разрушительная сила которого основана на использовании энергии реакции ядерного синтеза лёгких элементов в более тяжёлые (например, синтеза одного ядра атома гелия из двух ядер атомов дейтерия, при которой выделяется колоссальное количество энергии).

Имея те же поражающие факторы, что и у ядерного оружия, термоядерное отличается намного большей возможной мощностью взрыва (теоретически, она ограничена только количеством имеющихся в наличии компонентов). Следует отметить, что часто упоминаемое утверждение о том, что радиоактивное заражение от термоядерного взрыва гораздо слабее, чем от атомного, касается реакций синтеза, которые используются только совместно с гораздо более «грязными» реакциями деления. Термин «чистое оружие», появившийся в англоязычной литературе к концу 1970-х гг., вышел из употребления. На деле все зависит от выбранного типа реакции, используемой в том или ином изделии. Так, включение в термоядерный заряд элементов из урана-238* позволяет намного (до 5 раз) повысить общую мощность взрыва, а также значительно (в 5–10 раз) увеличивает количество радиоактивных осадков.

Общее описание. Термоядерное взрывное устройство может быть построено как с использованием жидкого дейтерия, так и газообразного сжатого. Но появление термоядерного оружия стало возможным только благодаря разновидности гидрида лития — дейтериду лития-6.

Дейтерид лития-6 — твёрдое вещество, позволяющее хранить дейтерий (обычное состояние которого в нормальных условиях — газ) при плюсовых температурах, кроме того, второй его компонент — литий-6 — является сырьём для получения самого дефицитного изотопа водорода — трития. Собственно, ${}^6\text{Li}$ — единственный промышленный источник получения трития.

В ранних термоядерных боеприпасах США использовался также и дейтерид природного лития, содержащего в основном изотоп лития-7. Он также служит источником трития, но для этого нейтроны, участвующие в реакции, должны иметь энергию 10 МэВ и выше.

Термоядерная бомба, действующая по принципу Теллера — Улама, состоит из двух ступеней: триггера и контейнера с термоядерным горючим. Триггер — это небольшой плутониевый ядерный заряд с термоядерным усилением и мощностью в несколько килотонн. Задача триггера — создать необходимые условия для разжигания термоядерной реакции — высокую температуру и давление.

Контейнер с термоядерным горючим — основной элемент бомбы. Он изготовлен из урана-238 — вещества, делящегося под воздействием быстрых выделяющихся при реакции синтеза нейтронов (> 1 МэВ) и поглощающего медленные нейтроны. Может быть выполнен из свинца. Контейнер покрывается слоем нейтронного поглотителя (соединений бора) для предотвращения

* При этом используемый в водородной бомбе уран-238 делится под действием быстрых нейтронов и даёт радиоактивные продукты деления. Сами нейтроны производят наведённую радиоактивность.

преждевременного разогрева термоядерного горючего потоком нейтронов от триггера, что может помешать его эффективному обжатию. Внутри контейнера находится термоядерное горючее — дейтерид лития-6 — и расположенный по оси контейнера плутониевый стержень, играющий роль запала термоядерной реакции. Расположенные соосно триггер и контейнер заливаются специальным пластиком, проводящим излучение от триггера к контейнеру, и помещаются в корпус бомбы, изготовленный из стали или алюминия. Возможен вариант, когда вторая ступень делается не в виде цилиндра, а в виде сферы. Принцип действия тот же, но вместо плутониевого запального стержня используется плутониевая полая сфера, находящаяся внутри и перемежающаяся со слоями дейтерида лития-6. При ядерных испытаниях бомбы со сферической формой второй ступени показали большую эффективность, чем бомбы с цилиндрической формой второй ступени.

При взрыве триггера 80 % выделяющейся из него энергии расходуется на мощный импульс мягкого рентгеновского излучения, которое поглощается оболочкой второй ступени. В результате резкого нагрева урановой (свинцовой) оболочки происходит абляция вещества оболочки и появляется реактивная тяга, которая вместе со световым давлением обжимает вторую ступень, при этом её объём уменьшается в несколько тысяч раз и термоядерное топливо нагревается до температур, близких к минимальным для начала реакции. Плутониевый стержень переходит в надкритическое состояние, и начинается ядерная реакция внутри контейнера. Испускаемые сгорающим плутониевым стержнем нейтроны взаимодействуют с литием-6, в результате чего получается тритий, который взаимодействует с дейтерием.

Если оболочка контейнера была изготовлена из природного урана, то быстрые нейтроны, образующиеся в результате реакции синтеза, вызывают в ней реакции деления атомов урана-238, добавляющие свою энергию в общую энергию взрыва. Подобным образом создаётся термоядерный взрыв практически неограниченной мощности, так как за оболочкой могут располагаться ещё и другие слои дейтерида лития и слои урана-238 (слойка).

Устройство термоядерного боеприпаса. Термоядерные боеприпасы существуют как в виде авиационных бомб (*водородная* или *термоядерная бомба*), так и боеголовок для баллистических и крылатых ракет (рис. 1.11).

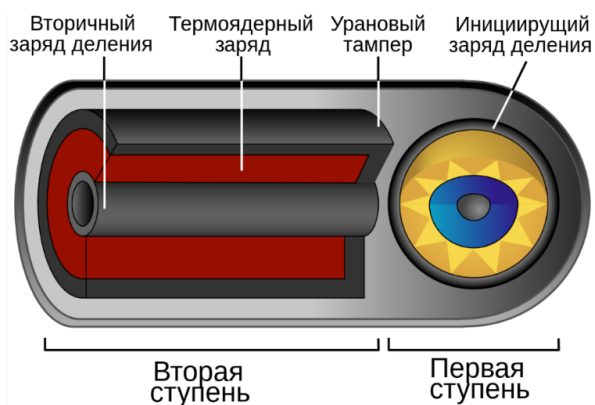


Рис. 1.11. Устройство термоядерного боеприпаса

5.2. История создания термоядерного оружия

Для разработки и совершенствования ядерного и термоядерного оружия были созданы оружейные ядерные центры. Первый американский центр — Лос-Аламосская национальная лаборатория — организован в разгар Второй мировой войны в 1943 г. для разработки ядерной бомбы, основанной на использовании энергии деления ядер тяжёлых элементов — урана-235 и плутония-239. В 1952 г. правительство США организовало второй оружейный ядерный центр — Ливерморскую национальную лабораторию по разработке термоядерного оружия.

Идея бомбы с термоядерным синтезом, инициируемым атомным зарядом, была предложена Э. Ферми его коллеге Э. Теллеру еще в 1941 г., в самом начале Манхэттенского проекта. Значительную часть своей работы в ходе данного проекта Теллер посвятил работе над проектом бомбы синтеза, в некоторой степени пренебрегая собственно атомной бомбой. Его ориентация на трудности и позиция «адвоката дьявола» в обсуждениях проблем заставили Оппенгеймера увести Теллера и других «проблемных» физиков на запасной путь.

Первые важные и концептуальные шаги к осуществлению проекта синтеза сделал сотрудник Теллера Станислав Улам. Для инициирования термоядерного синтеза Улам предложил сжимать термоядерное топливо до начала его нагрева, используя для этого факторы первичной реакции расщепления, а также разместить термоядерный заряд отдельно от первичного ядерного компонента бомбы. Эти предложения позволили перевести разработку термоядерного оружия в практическую плоскость. Исходя из этого, Теллер предположил, что рентгеновское и γ -излучение, порождённые первичным взрывом, могут передать достаточно энергии во вторичный компонент, расположенный в общей оболочке с первичным, чтобы осуществить достаточную имплозию (обжатие) и инициировать термоядерную реакцию. Позднее Теллер, его сторонники и противники обсуждали вклад Улама в теорию, лежащую в основе этого механизма.

В 1951 г. была проведена серия испытаний под общим наименованием “Operation Greenhouse”, в ходе которой отрабатывались вопросы миниатюризации ядерных зарядов при увеличении их мощности. Одним из испытаний в этой серии стал взрыв под кодовым наименованием «Джордж», в котором было взорвано экспериментальное устройство, представлявшее собой ядерный заряд в виде тора с небольшим количеством жидкого водорода, помещённым в центре. Основная часть мощности взрыва была получена именно за счёт реакции синтеза водорода, что подтвердило на практике общую концепцию двухступенчатых устройств.

1 ноября 1952 г. на атолле Энивенок (Маршалловы острова) под наименованием «Иви Майк» было проведено полномасштабное испытание двухступенчатого устройства с конфигурацией Теллера — Улама. Мощность взрыва составила 10,4 Мт, что в 450 раз превысило мощность бомбы, сброшенной в 1945 г. на японский город Нагасаки. Устройство общей массой 62 т включало в себя криогенную ёмкость со смесью жидких дейтерия и трития и обычный ядерный заряд, расположенный сверху. По центру криогенной ёмкости проходил плутониевый стержень, являвшийся «свечой зажигания» для термоядерной реакции. Оба компонента заряда были помещены в общую оболочку из урана массой 4,5 т, заполненную полиэтиленовой пеной, игравшей роль проводника для рентгеновского и γ -излучения от первичного заряда ко вторичному.

Устройство, испытанное США в 1952 г., фактически «бомбой» не являлось, а представляло собой лабораторный образец, «3-этажный дом, наполненный жидким дейтерием», выполненный в виде специальной конструкции. Советские же учёные разработали именно бомбу — законченное устройство, пригодное к практическому применению.

Смесь жидких изотопов водорода не имела практического применения для термоядерных боеприпасов, и последующий прогресс в развитии термоядерного оружия связан с использованием твёрдого топлива — дейтерида лития-6. В 1954 г. эта концепция была проверена на атолле Бикини в ходе испытаний «Bravo» из серии «Operation Castle» при взрыве устройства под кодовым названием «Креветка». Термоядерным топливом в устройстве служила смесь 40 % дейтерида лития-6 и 60 % дейтерида лития-7. Расчёты предусматривали, что литий-7 не будет участвовать в реакции, однако некоторые разработчики подозревали и такую возможность, предсказывая увеличение мощности взрыва до 20 %. Реальность оказалась гораздо более драматичной: при расчётной мощности в 6 Мт реальная составила 15, это испытание стало самым мощным взрывом из когда-либо произведённых Соединёнными Штатами.

Вскоре развитие термоядерного оружия в США было направлено в сторону миниатюризации конструкции Теллера — Улама, которой можно было бы оснастить межконтинентальные баллистические ракеты (МБР/ICBM) и баллистические ракеты подводных лодок (БРПЛ/SLBM). К 1960 г. на вооружение были приняты боеголовки мегатонного класса W47, развёрнутые на подводных лодках, оснащённых баллистическими ракетами «Поларис». Боеголовки имели массу 700 фунтов (320 кг) и диаметр 18 дюймов (50 см). Более поздние испытания показали низкую надёжность боеголовок, установленных на ракеты «Поларис», и необходимость их доработки. К середине 1970-х гг. миниатюризация новых версий боеголовок по схеме Теллера — Улама позволила размещать 10 и более боеголовок в габаритах боевой части ракет с разделяющимися головными частями (РГЧ/MIRV).

В Великобритании разработка термоядерного оружия были начата в 1954 г. в Олдермастоне группой под руководством сэра Уильяма Пеннея, ранее участвовавшего в Манхэттенском проекте. В целом информированность британской стороны по термоядерной проблеме находилась на весьма зачаточном уровне, так как Соединённые Штаты не делились информацией, ссылаясь на Закон об атомной энергии 1946 г. Тем не менее британцам разрешали вести наблюдения и они использовали самолёт для отбора проб в ходе проведения американцами ядерных испытаний, что давало информацию о продуктах ядерных реакций, получавшихся во вторичной стадии лучевой имплозии. Из-за этих трудностей в 1955 г. британский премьер-министр Энтони Иден согласился с секретным планом, предусматривавшим разработку очень мощной атомной бомбы в случае неудачи Олдермастонского проекта или больших задержек в его реализации.

В 1957 г. Великобритания провела серию испытаний на островах Рождества в Тихом океане под общим наименованием «Operation Grapple» («Операция Схватка»). Первым под наименованием «Short Granite» («Хрупкий гранит») было испытано опытное термоядерное устройство мощностью около 300 кт, оказавшееся значительно слабее советских и американских аналогов, тем не менее британское правительство объявило об успешном испытании термоядерного

устройства. В ходе испытания “Orange Herald” («Оранжевый вестник») была взорвана усовершенствованная атомная бомба мощностью 700 кт — самая мощная из когда-либо созданных на Земле атомных (не термоядерных) бомб. Почти все свидетели испытаний (включая экипаж самолёта, который ее сбросил) считали, что это была термоядерная бомба. Бомба оказалась слишком дорогой в производстве, так как в её состав входил заряд плутония массой 117 кг, а годовое производство плутония в Великобритании составляло в то время 120 кг. Другой образец бомбы был взорван в ходе третьих испытаний — “Purple Granite” («Фиолетовый гранит»), его мощность составила приблизительно 150 кт.

В сентябре 1957 г. была проведена вторая серия испытаний. И 8 ноября первым в испытании под названием “Grapple X Round C” было взорвано двухступенчатое устройство с более мощным зарядом деления и более простым зарядом синтеза. Мощность взрыва составила приблизительно 1,8 Мт. 28 апреля 1958 г. в ходе испытаний “Grapple Y” над островом Рождества была сброшена бомба мощностью 3 Мт — самое мощное британское термоядерное устройство, а 2 сентября 1958 г. в рамках тех же испытаний был взорван облегчённый вариант устройства, мощность которого составила около 1,2 Мт.

При последнем испытании “Halliard 1”, проведённом 11 сентября 1958 г., было взорвано трёхступенчатое устройство мощностью около 800 кт. На эти испытания были приглашены американские наблюдатели. После успешного взрыва устройств мегатонного класса (что подтвердило способности британской стороны самостоятельно создавать бомбы по схеме Теллера — Улама) Соединённые Штаты пошли на ядерное сотрудничество с Великобританией, заключив в 1958 г. соглашение о совместной разработке ядерного оружия. Вместо разработки собственного проекта британцы получили доступ к проекту малых американских боеголовок Mk 28 с возможностью изготовления их копий.

Своё первое термоядерное устройство типа Теллер — Улам мощностью 3,36 Мт Китай испытал в июне 1967 г. (известно также под наименованием «Испытание номер 6»). Испытание было проведено спустя всего 32 месяца после взрыва первой китайской атомной бомбы, что является примером самого быстрого развития национальной ядерной программы от реакции расщепления к синтезу.

Франция в ходе испытаний «Канопус» в августе 1968 г. взорвала термоядерное устройство типа Теллер — Улам мощностью около 2,6 Мт. Информации о развитии французской программы очень мало.

В Советском Союзе вопрос о реализации термоядерной реакции был поставлен в конце 1945 г., а к 1948 г. определены основополагающие идеи создания термоядерного оружия. Об истории создания термоядерного устройства в СССР написано выше и в исторической очерке*.

Технология выделения трития из облучённых литиевых блоков и получения необходимых соединений для использования в термоядерном оружии в ряде случаев была драматичной. Это относилось к первым годам отработки технологии, когда наблюдались крайне неблагоприятные условия труда и регистрировались острые и хронические лучевые поражения персонала. Так, в начале 1953 г. в производстве газообразного трития произошла серьёзная авария на участке выделения трития из облучённых литиевых блоков-поглотителей.

* Ентяков Б. Н. Создание производства трития в СССР. URL: <http://book.sarov.ru/wp-content/uploads/2017/12/IHISM-14-3.pdf>.

В 1946 г. был образован первый советский оружейный центр в г. Сарове Горьковской (ныне Нижегородской) области. Усилия советских специалистов завершились успешным ядерным испытанием 29 августа 1949 г., а в 1955 г. создан второй центр в г. Снежинске Челябинской области, где преимущественно занимаются разработкой и совершенствованием термоядерного оружия. Наряду с этим Снежинский центр до сих пор является единственным в мире по разработке ядерных зарядов для мирных промышленных целей.

Первое советское термоядерное устройство РДС-6с («слойка», оно же «Джо-4») было взорвано 12 августа 1953 г. на полигоне в Семипалатинске. Проект был разработан в 1949 г. (ещё до испытания первой советской ядерной бомбы) Сахаровым и Гинзбургом и имел конфигурацию заряда, отличную от ныне известной раздельной схемы Теллера — Улама. В заряде слои расщепляющегося материала чередовались со слоями топлива синтеза — дейтерида лития в смеси с тритием. Заряд синтеза, располагающийся вокруг заряда деления малоэффективно увеличивал общую мощность устройства (современные устройства типа Теллер — Улам могут дать коэффициент умножения до 30 раз). Кроме того, области зарядов деления и синтеза перемежались с обычным взрывчатым веществом — инициатором первичной реакции деления, что дополнительно увеличивало необходимую массу обычной взрывчатки. Первое устройство РДС-6с на Западе получило наименование «Джо-4» (первые советские ядерные испытания получали кодовые наименования от американского прозвища Иосифа (Джозефа) Сталина «Дядя Джо»). Мощность взрыва была эквивалентна 400 кт (КПД равен 15–20 %). Расчёты показали, что разлёт непрореагировавшего материала препятствует увеличению мощности свыше 750 кт.

В конце 1953 г. физик Давиденко предложил располагать первичный (деление) и вторичный (синтез) заряды в отдельных объёмах, повторив таким образом схему Теллера — Улама. Следующий большой шаг был предложен и развит Д. Франк-Каменецким, Ю. Трутневым, А. Сахаровым и Я. Зельдовичем в 1953 г. (Проект 49), предполагалось использование рентгеновского излучения реакции деления для сжатия дейтерида лития перед синтезом, то есть была разработана идея радиационной имплозии. «Третья идея» Сахарова проверена в ходе испытаний РДС-37 мощностью 1,6 Мт в ноябре 1955 г. Дальнейшее развитие этой идеи подтвердило практическое отсутствие принципиальных ограничений на мощность термоядерных зарядов.

Самая крупная водородная бомба — это советская 50-мегатонная «Царь-бомба», взорванная 30 октября 1961 г. на полигоне архипелага Новая Земля, КПД устройства составил почти 97 %. Это было самое мощное взрывное устройство, когда-либо разработанное и испытанное на Земле.

Хрущёв впоследствии публично пошутил, что первоначально предполагалось взорвать 100-мегатонную бомбу, но заряд уменьшили, «чтобы не побить все стёкла в Москве». Конструктивно бомба действительно была рассчитана на 100 Мт, и этой мощности можно было добиться заменой свинцового тампера на урановый. Бомба была взорвана на высоте 4000 м над полигоном «Новая Земля». Ударная волна после взрыва три раза обогнула земной шар. Несмотря на успешное испытание, бомба на вооружение не поступила, тем не менее создание и испытание сверхбомбы имели большое политическое значение, продемонстрировав, что СССР решил задачу достижения практически

любого уровня мегатоннажа ядерного арсенала. Любопытно отметить, что после этого прекратился рост мегатоннажа ядерного арсенала США.

Первое испытание термоядерного устройства (бомбы) было проведено 12 августа 1953 г. на Семипалатинском полигоне, 22 ноября 1955 г. успешным испытанием водородной бомбы на том же полигоне был завершён этап разработки основ термоядерного оружия. Соединённые Штаты и Советский Союз примерно одновременно (1954 и 1955 гг.) пришли к современному облику термоядерного оружия. Дальнейшее его развитие шло по пути совершенствования и специализации.

Таким образом, предприятия по получению трития и его соединений обязаны своим возникновением и развитием разработке термоядерного оружия. После создания этого оружия большие перспективы получили работы по овладению управляемым термоядерным синтезом. Российские учёные и специалисты активно занимаются созданием энергетического термоядерного реактора. Если управляемая термоядерная реакция для получения электроэнергии пока является довольно далекой перспективой, то установки для этих целей с использованием термоядерного взрыва являются реальностью. К настоящему времени завершается разработка энергоустановок, где в качестве источника энергии используются периодически повторяющиеся термоядерные взрывы. В установках КВС (котёл взрывного сгорания) в качестве инициатора применяется уран-233, а основного топлива — изотопы водорода (дейтерий и тритий). Эти установки имеют большое преимущество по всем технико-экономическим показателям по сравнению с традиционными АЭС. Кроме того, уникальный изотоп водорода — тритий нашёл широкое применение в различных областях науки и техники.

5.3. Нейтронное вооружение

Цель создания нейтронного оружия в 1960–1970-х гг. — получение тактического ядерного боезаряда, главным поражающим фактором которого являлся бы поток быстрых нейтронов, а доля других поражающих факторов была бы существенно меньше. Радиус зоны смертельного уровня нейтронного облучения в таких зарядах может даже превосходить радиусы поражения ударной волной или световым излучением.

Создание нейтронного оружия было вызвано низкой эффективностью обычных тактических ядерных зарядов против бронированных целей. Благодаря наличию бронированного корпуса и системы фильтрации воздуха бронетехника способна противостоять всем поражающим факторам ЯВ: ударная волна, световое излучение, проникающая радиация, радиоактивное заражение местности — и может эффективно решать боевые задачи даже в относительно близких к эпицентру районах. Кроме того, для создаваемой в то время системы ПРО с ядерными боевыми частями у противоракет было бы так же неэффективно использовать обычные ядерные заряды. В условиях взрыва в верхних слоях атмосферы воздушная ударная волна практически отсутствует, а испускаемое зарядом мягкое рентгеновское излучение может интенсивно поглощаться оболочкой боеголовки. Поток нейтронов с лёгкостью проходит даже через толстую стальную броню, намного сильнее проникает сквозь преграды, чем рентгеновское или γ -излучение, не говоря уже об α - и β -частицах. Благодаря

этому нейтронное оружие способно поражать живую силу противника на значительном расстоянии от эпицентра взрыва и в укрытиях, даже там, где обеспечивается надёжная защита от обычного ядерного взрыва.

Нейтронный заряд конструктивно представляет собой обычный ядерный заряд малой мощности, к которому добавлен блок, содержащий небольшое количество термоядерного топлива (смесь дейтерия и трития). При подрыве взрывается основной ядерный заряд, энергия которого используется для запуска термоядерной реакции. Большая часть энергии при взрыве нейтронного боеприпаса выделяется в результате реакции синтеза:



Нейтроны не должны поглощаться конструкционными материалами бомбы и атомами делящегося материала. Для того чтобы дейтериево-тритиевая смесь горела с высоким КПД, термоядерное горючее должно быть предварительно сжато раз в 10 по каждому из измерений, что достигается с помощью схемы радиационной имплозии.

В отличие от классических термоядерных зарядов, где в качестве термоядерного топлива находится дейтерид лития, вышеприведённая реакция имеет свои преимущества: во-первых, несмотря на дороговизну трития и его нетехнологичность, эту реакцию легко поджечь; во-вторых, большая часть энергии — до 80 % выделяется в виде высокоэнергетических нейтронов и только 20 % приходится на остальные поражающие факторы (ударную волну, ЭМИ, световое, γ - и рентгеновское излучения). Из особенностей конструкции стоит отметить отсутствие плутониевого запального стержня (из-за малого количества термоядерного топлива и низкой температуры начала реакции необходимость в нём отсутствует).

Общее количество делящихся материалов для 1 кт нейтронной бомбы около 10 кг, при этом на долю реакции синтеза будет приходиться 75 % мощности (то есть 0,75 кт), что означает наличие 10 г дейтерий-тритиевой смеси. Газ необходимо сжать до плотности 0,25 г/см³, то есть до объёма около 40 см³ (шарик 5–6 см в диаметре).

При мощности нейтронного заряда в 1 кт доза облучения в 8000 рад, которая ведёт к немедленной смерти (минуты), будет получена экипажем танка, например Т-72, на расстоянии в 700 м от эпицентра взрыва. При обычном атомном взрыве этой же мощности аналогичное расстояние будет равняться 360 м. Опасный для жизни уровень в 600 рад достигается на дистанции 1100 и 700 м для бронированных целей и 1350 и 900 м для незащищённых людей. Нейтроны дополнительно создают в конструкционных материалах (например, в броне танка) наведённую радиоактивность. Если в рассмотренный выше Т-72 сядет новый экипаж, то он получит летальную дозу в течение 24 часов. Новые виды брони более эффективно защищают танк от нейтронного потока. Для этого в её состав входит пластик с долей бора — хорошего поглотителя нейтронов. Броня танка М-1 Abrams обеднена элементами, дающими сильную наведённую радиоактивность.

Из-за сильного поглощения и рассеивания нейтронов в атмосфере дальность поражения нейтронным излучением невелика, поэтому изготовление нейтронных зарядов высокой мощности нецелесообразно. Реально производимые

нейтронные боеприпасы имеют мощность не более 1 кт. Подрыв такого боеприпаса дает зону поражения нейтронным излучением радиусом около 1,5 км (незащищённый человек получит опасную для жизни дозу радиации на расстоянии 1350 м). Вопреки распространённому мнению, нейтронный взрыв вовсе не оставляет материальные ценности невредимыми: зона сильных разрушений ударной волной для того же килотонного заряда имеет радиус приблизительно 1 км. Ударная волна может уничтожить или сильно повредить большинство зданий.

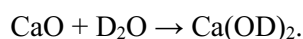
Опасность нейтронного оружия, как и вообще ядерного оружия малой мощности, заключается не столько в возможности массового уничтожения людей, сколько в стирании грани между ядерной и обычной войной при его использовании. В 1978 г., когда в США ещё не был решён вопрос о производстве нейтронного оружия, СССР предложил договориться об отказе от его применения и внёс на рассмотрение Комитета по разоружению проект международной конвенции о его запрещении. Проект не нашёл поддержки у США и других западных стран. В 1981 г. в США начато производство нейтронных зарядов, в настоящее время они стоят на вооружении.

Глава 6. Тритий в окружающей среде

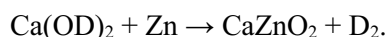
В 1946 г. У. Ф. Либби, известный авторитет в области ядерной физики, лауреат Нобелевской премии, предположил, что тритий непрерывно образуется в результате идущих в атмосфере ядерных реакций. Первые измерения радиоактивности природного водорода, хотя и были неудачными, показали, что отношение Н:Т на 5 порядков меньше, чем думали раньше, и составляет не более $1:10^{17}$. Стала очевидной невозможность обнаружения трития масс-спектрометрически даже при самых больших обогащениях: к началу 1950-х гг. масс-спектрометры позволяли определять концентрации примесей при их содержании не менее 10^{-4} %.

В 1951 г. группа американских физиков из Чикагского университета с участием У. Либби достала хранившуюся «резерфордскую» ампулу с 11 мл сверхобогащённой тяжёлой воды, в которой Ф. У. Астон когда-то пытался обнаружить тритий масс-спектрометрически. И хотя с момента выделения этого образца из природной воды прошло полтора десятка лет и от содержащегося в нём трития осталось меньше половины, результат не заставил себя ждать: тяжёлая вода была радиоактивна! Измеренная активность с учётом обогащения при получении образца соответствовала природному содержанию трития $1:10^{18}$.

Чтобы застраховаться от возможной ошибки, решили повторить всё с самого начала, тщательно следя за каждым шагом этого решающего эксперимента. Авторы попросили норвежскую компанию приготовить ещё несколько образцов обогащённой воды. Воду взяли из горного озера на севере Норвегии в январе 1948 г., из неё путём электролитического концентрирования получили 15 мл тяжёлой воды. Её перегнали и ввели в реакцию с оксидом кальция:



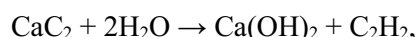
Восстановлением цинком из дейтероксида кальция при температуре красного каления получили дейтерий:



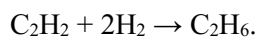
Масс-спектрометрический анализ показал, что получен чистейший дейтерий, который и запустили в счётчик Гейгера, чтобы измерить его радиоактивность. Газ оказался радиоактивным, а это означало, что вода, из которой был выделен дейтерий, содержала тритий. Аналогично было приготовлено и проанализировано ещё несколько образцов для того, чтобы уточнить, сколько же трития содержится на самом деле в природном водороде.

Исключительная тщательность работы не оставляла никаких сомнений в полученных результатах, но ещё за год до окончания этой работы вышла статья Ф. Фалтинга и того же П. Хартека из Физико-химического института при Гамбургском университете, в которой сообщалось об обнаружении трития в атмосферном водороде. Таким образом, Хартек дважды участвовал в открытии трития: сначала — искусственного, а через 16 лет — природного.

Воздух — не самый богатый источник водорода: его в нём всего 0,00005 % (на уровне моря). Поэтому по заказу немецких физиков фирма «Линде» переработала 100 тыс. м³ воздуха, из которого путём сжижения и ректификации был выделен водород, а из него окислением на оксиде меди получено 80 г воды. С помощью электролиза эта вода была сконцентрирована в несколько десятков раз, затем ею был «погашен» карбид кальция:



а ацетилен прогидрирован оставшимся водородом до этана:



Полученный этан, в который переходил весь исходный тритий, затем анализировали на радиоактивность. Расчёт показал, что трития (в виде молекул НТ) в воздухе исключительно мало: в 20 см³ воздуха содержится одна молекула трития, то есть во всей атмосфере его должно быть всего... 1 моль, или 3 г. Однако если учесть, что водорода в воздухе исключительно мало, то получается, что атмосферный молекулярный водород обогащён тритием в 10 тыс. раз больше, чем водород в составе дождевой воды. Отсюда следовало, что и свободный, и связанный водород в атмосфере имеет разное происхождение. Подсчёт показал также, что во всех водоёмах Земли трития содержится всего лишь 100 кг.

Бета-частица ³Н обладает низкой проникающей способностью (максимальный пробег в воздухе при нормальных условиях 5,4 мм и 6,5 мкм в биологической ткани) и при внешнем облучении полностью поглощается в верхних слоях покровов организмов [Биологические эффекты..., 1976]. Энергия связи составляет 8,1–8,4 МэВ, энергия связи на одну частицу равна 2,7–2,8 МэВ, что значительно меньше, чем в ядре гелия. Это имеет большое значение, так как позволяет путем синтеза дейтерия и ³Н осуществлять идущие с огромным выделением энергии термоядерные реакции (Москалев, 1989). В газообразной форме ³Н может диффундировать через большое количество материалов, например, сталь, алюминий, пластик (Schell et al., 1974).

Полученное в Чикаго значение содержания трития в воде ($H:T = 1:10^{18}$), стало общепринятым. Такое содержание атомов трития даже получило специальное название — тритиевая единица (ТЕ). В 1 л воды в среднем содержится $3,2 \cdot 10^{-10}$ г трития, в 1 л воздуха — $1,6 \cdot 10^{-14}$ г (при абсолютной влажности 10 мг/л). Образуется тритий в верхних слоях атмосферы с участием космического излучения со скоростью 1200 атомов в секунду в расчёте на 1 м² земной поверхности. Таким образом, в течение тысячелетий содержание трития в природе было почти постоянным: непрерывное его образование в атмосфере компенсировалось естественным распадом. Однако с 1954 г. (начало испытаний термоядерных бомб) положение резко изменилось и в дождевой воде содержание трития увеличилось в тысячи раз. И это не удивительно: взрыв водородной бомбы мощностью 1 Мт приводит к выделению от 0,7 до 2 кг трития. Общая мощность воздушных взрывов составила за 1945–1962 гг. 406 Мт, а наземных — 104 Мт, при этом общее количество трития, поступившее в биосферу в результате испытаний, составило сотни килограммов! После прекращения наземных испытаний уровень трития пошёл на убыль. В последние годы основным источником техногенного трития в окружающей среде стали атомные электростанции, которые ежегодно выделяют несколько десятков килограммов трития.

В докладе за 2000 г. Научного комитета ООН по действию атомной радиации общее количество естественного трития принимается равным приблизительно $1,3 \cdot 10^{18}$ Бк. Около 99 % общего количества природного трития превращается в тритированную воду и участвует в глобальном круговороте воды со следующим распределением по средам в равновесном состоянии:

- в океанах — приблизительно 66 %;
- на земной поверхности и в биосфере — приблизительно 27 %;
- в атмосфере — приблизительно 7 %.

Современные радиохимические методы позволяют с большой точностью определять содержание трития в сравнительно небольшом количестве воды, взятой из того или иного источника. *Для чего это нужно?*

Оказывается, радиоактивный тритий с весьма удобным временем жизни — чуть больше 10 лет — может дать много ценной информации. У. Либби назвал тритий «радиоводородом», по аналогии с радиоуглеродом. Тритий может служить прекрасной меткой для изучения различных природных процессов. С его помощью можно определять возраст растительных продуктов, например вин (если им не больше 30 лет), поскольку виноград поглощает тритий из почвенных вод, а после снятия урожая содержание трития в виноградном соке начинает снижаться с известной скоростью. Сам Либби провёл множество подобных анализов, переработав сотни литров различных вин, поставленных ему виноделами из разных местностей. Анализ атмосферного трития даёт ценную информацию о космических лучах, а тритий в осадочных породах может свидетельствовать о перемещениях воздуха и влаги на Земле.

Наиболее богатые природные источники трития — дождь и снег, поскольку почти весь элемент, образующийся под действием космических лучей в атмосфере, переходит в воду. Интенсивность космической радиации изменяется с широтой, поэтому осадки, например в средней полосе России, несут

в несколько раз больше трития, чем тропические ливни. И совсем мало трития в дождях, которые идут над океаном, поскольку их источник — в основном та же океаническая вода, а в ней трития немного. Понятно, что глубинный лёд Гренландии или Антарктиды совсем не содержит трития: он там давно успел полностью распасться. Если знаешь скорость образования трития в атмосфере, можно рассчитать, как долго влага находится в воздухе — с момента её испарения с поверхности до выпадения в виде дождя или снега. Оказалось, что, например, в воздухе над океаном этот срок составляет в среднем 9 дней.

Запасы природного трития ничтожны. Поэтому весь тритий, используемый для различных целей, получают искусственно — путём облучения лития нейтронами. Таким образом, стало возможным получить значительные количества чистого трития и изучить его свойства и свойства его соединений. Так, сверхтяжёлая вода T_2O имеет плотность $1,21459 \text{ г/см}^3$. Синтезированный тритий сравнительно дешёв и находит применение в научных исследованиях и в промышленности. Широко используются тритиевые светящиеся краски, которые наносят на шкалы приборов. Эти светосоставы с точки зрения радиации менее опасны, чем традиционные радиевые. Например, сульфид цинка, содержащий небольшое количество соединений трития (примерно $0,03 \text{ мг}$ на 1 г светосостава), непрерывно излучает зелёный свет. Такие светосоставы постоянного действия востребованы при изготовлении указателей, шкал приборов и др., на их производство ежегодно расходуют сотни граммов трития.

Многие исследователи относят тритий к слабым радиоизотопам, но это устаревшая точка зрения. Радиоактивный 3H выбрасывается из реактора в атмосферу, выделяется в виде водяного пара и может поступать в организм с воздухом, пищей, водой, превращаясь при этом в органически связанный тритий, он встраивается в протеиновые молекулы и надолго остаётся в организме. В 1970–1980 гг. проводились исследования на крысах, которым давали тритиевую воду. Эта разовая доза сохранялась в их организмах, и через три недели тритий нигде не вымывался.

Считалось, что этот не очень активный изотоп не представляет особой проблемы, но с точки зрения биологии, чем изотоп слабее, тем он опаснее. С точки зрения радиационной безопасности тритий как радионуклид (мягкий β -излучатель, $E_{\text{ср}} = 5,71 \text{ кэВ}$), на первый взгляд менее значим, чем, например, ^{90}Sr или ^{137}Cs , однако в газовых выбросах он, как правило, содержится в химической форме воды и его попадание в организм человека может привести к крайне опасным последствиям, в том числе и на генетическом уровне. На рис. 1.12 приведены пути поступления трития в организм.

Интегрированный в живой организм тритий эффективно включается в состав биологической ткани, вызывая мутагенные нарушения. Распадаясь, он превращается в гелий, выделяя при этом довольно интенсивное β -излучение. Энергия его β -частиц относительно невелика, поэтому при нахождении вне организма (внешнее облучение) тритий особой угрозы не представляет, однако при внутреннем облучении (при попадании трития внутрь организма человека с воздухом или водой) он может представлять серьёзную опасность для здоровья. Являясь изотопом водорода, тритий химически ведёт себя так же, как водород, и потому способен замещать его во всех соединениях с кислородом, серой,

азотом, легко проникая в протоплазму любой клетки. В этом случае действие испускаемого тритием β -излучения чревато повреждением генетического аппарата клеток.

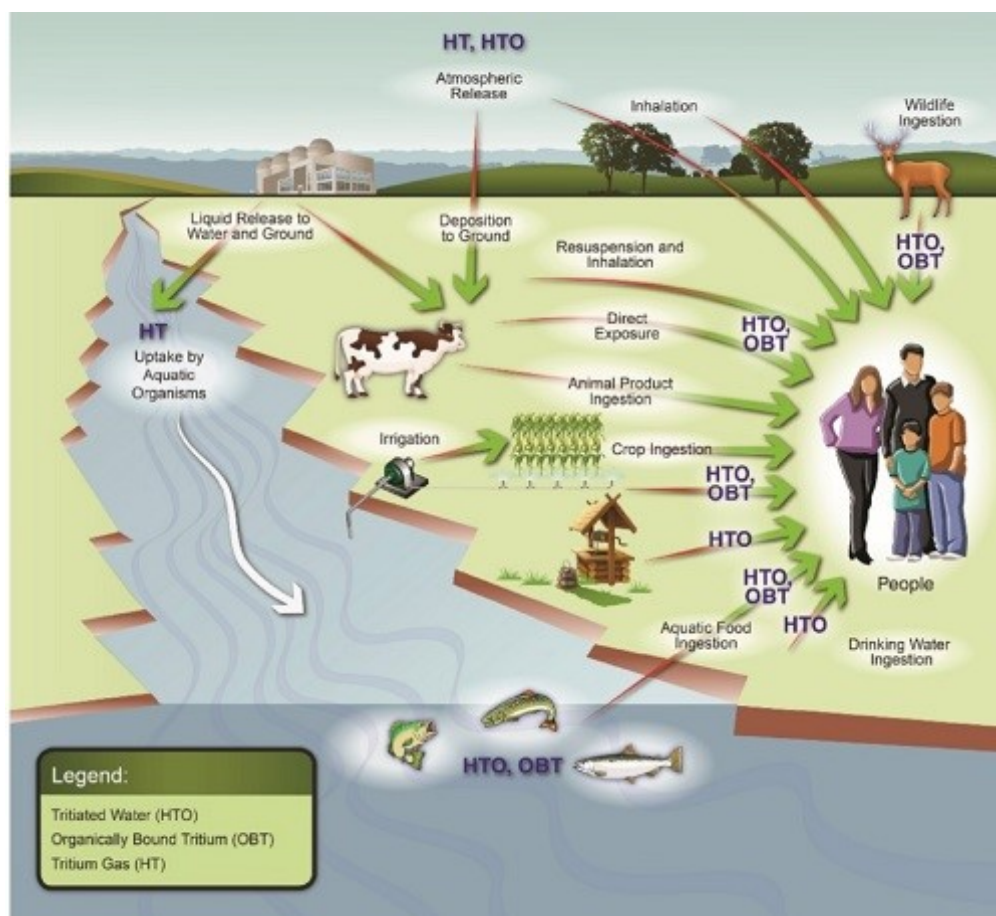


Рис. 1.12. Пути попадания трития в организм (иллюстрация CNSC, <http://www.atominfo.ru/news02/a0128.htm>)

Удельный вклад поступления трития с вдыхаемым воздухом и через кожные покровы составляет от 15 до 20 % от дозы, обусловленной фактическим содержанием трития в организме. С продуктами питания и питьевой водой поступает от 80 до 85 % этого радионуклида, обладающего большой миграционной способностью.

Необходимо разработать таблицы, в которых бы четко указывалось, какие радионуклиды и какую опасность представляют. Порядка 150 радионуклидов имеют большой период полураспада, и мы должны понимать, насколько они опасны. Хотя такого рейтинга радионуклидов пока не существует, однако тритий в нём окажется среди наиболее опасных радионуклидов. К нему близки радиоуглерод, радон, цезий, стронций и т. д.

Тритий — «генетически опасный» радионуклид [Москалев, 1989]. Требуется также интенсифицировать разработку методики определения

в биосредах органически связанного трития, уровни накопления которого в белковых фракциях организма оцениваются нерепрезентативно, а дозы облучения за счет связанной в молекулах ДНК фракции трития могут вносить дополнительно 60 % и более к величине дозы, обусловленной поступлением тритированной воды. По современным данным, эти 60 % ответственны за вредные последствия для здоровья населения, которые заставляют ужесточать нормативы содержания его в экологических объектах [Концептуальная модель..., 2020]. То есть тритий присутствует и в человеческом организме, поступает он в него с пищей, с вдыхаемым воздухом и через кожу (12 %). Интересно, что газообразный T_2 в 500 раз менее токсичен, чем сверхтяжёлая вода T_2O . Это объясняется тем, что молекулярный тритий, попадая с воздухом в лёгкие, затем быстро (примерно за 3 мин) выделяется из организма, тогда как тритий в составе воды задерживается в нём на 10 суток и успевает за это время передать ему значительную дозу радиации. В среднем организм человека содержит $5 \cdot 10^{-12}$ г трития, что дает вклад 0,13 мбэр в общую дозу годового облучения (это в сотни раз меньше облучения от других источников радиации). Интересно, что у людей, носящих часы, в которых стрелки и цифры покрыты тритиевым люминофором, содержание трития в теле в 5 раз выше среднего.

6.1. Закономерности поведения трития в окружающей среде

Как было сказано выше, природный тритий образуется в основном в атмосфере. Равновесное глобальное содержание природного трития, оцениваемое с учётом его радиоактивного распада, составляет приблизительно $1,3 \cdot 10^{18}$ Бк [Москалев, 1989]. Тритий выводится из тропосферы земной поверхности в результате выпадения атмосферных осадков и молекулярного обмена с периодом около 10 суток. Вымывание оксида трития атмосферными осадками происходит особенно интенсивно при сильном обмене водяного пара с каплями дождя, что характерно для слабого дождя в условиях малой влажности воздуха.

Поступление искусственного трития в окружающую среду началось с пуска промышленных реакторов и радиохимических производств, предназначенных для наработки оружейного плутония в США. Затем, начиная с ноября 1952 г. (после первого термоядерного взрыва), в атмосферу Земли было введено количество трития, более чем в 60–190 раз превысившее его естественный уровень. Рост количества трития на Земле обусловлен в основном проведением ядерных испытаний. При термоядерном взрыве тритий может выделяться в атмосферу либо как первоначально присутствующий компонент водородной бомбы, либо образовываться при ядерных реакциях взрыва. Общее количество глобально введённого трития от проведенных ядерных испытаний составило приблизительно $186 \cdot 10^{18}$ Бк.

В настоящее время основным источником техногенного трития является атомная промышленность. Промышленное освоение производства атомной энергии началось с момента пуска в 1954 г. в г. Обнинске первой атомной станции мощностью 5 МВт (эл.). По данным Международного агентства по атомной энергии (ИАЕА), в момент Чернобыльской катастрофы в мире функционировало 417 атомных энергоблоков, расположенных в 26 странах и производящих 285 ГВт электроэнергии (на сегодня — 440 реакторов). В настоящее время доля

электроэнергии, произведённой на АЭС в нашей стране, составляет около 6 % от мирового производства. Программа развития атомной энергетики в Российской Федерации на 1998–2005 гг. и на перспективу до 2010 г. предусматривает её широкое развитие после 2030 г., главным образом за счёт ввода в строй быстрых реакторов со смешанным уран-плутониевым топливом. При работе в штатном режиме атомные электростанции в экологическом отношении менее опасны, нежели тепловые, работающие на угле. Работа на АЭС связана с выбросом в атмосферу некоторых количеств долгоживущих радионуклидов. Данные о прогнозе поступления этих радионуклидов в окружающую среду по мере развития атомной энергетики таковы: мощность АЭС в мире с 76 ГВт в 1975 г. вырастет до 6650 ГВт к 2025 г., при этом поступление в биосферу ^{85}Kr , ^3H и ^{14}C в этот же период увеличится от 5 до 705, от 0,26 до 38 ЭБк/год и от 0,5 до 107 ПБк/год соответственно.

Вклад ядерной энергетики в первой половине 1980-х гг. в целом составил приблизительно 0,1 % от дозы, обусловленной природной радиоактивностью, а к 2000 г. — примерно 1 %

Распространение трития при разовых или непрерывных выбросах его ядерными установками, а также при испарении оксида трития из тритийсодержащих водоёмов и хранилищ отходов описывается общим законом турбулентной диффузии в приземном слое атмосферы. Сброшенный газообразный тритий окисляется в атмосфере до оксида трития со скоростью 0,2–3 % в сутки.

В условиях разовых и непрерывных выбросов трития ядерными установками эффективные скорости осаждения трития на земную поверхность недостаточны для полного истощения облака при перемещении его в пределах района размещения установки. Этот фактор, а также включение осевшего трития в общий гидрологический цикл приводят к региональному и глобальному распространению трития при выбросах его в атмосферу [Иваницкая, Малофеева, 2001]. Скорость ветра и распределение температуры воздуха по вертикали являются основными параметрами интенсивного рассеяния выброса.

Тритий имеет некоторые сезонные особенности поведения в окружающей среде. В зимний период загрязнение приземной атмосферы тритием обусловлено только воздушными выбросами предприятия, в летний — радионуклид поступает в приземную атмосферу с воздушными выбросами предприятия и за счёт испарения с промышленных водоёмов, испарения из почвенно-растительного покрова. В конце зимнего периода 62 % запаса трития сосредоточено в снежном покрове, 24 % — в верхнем слое почвы и 14 % — в древесной растительности с учётом весеннего сокодвижения. В летний период основным депо трития становятся водоёмы и верхний слой почвы, на них приходится до 86 %, в древесной и травянистой растительности содержится 11 и 3 % соответственно [Моделирование кинетики..., 2000; Моделирование реэмиграции..., 2000; Иваницкая, Малофеева, 2001; Экологические проблемы..., 2003].

Помимо непосредственного сброса трития с жидкими отходами, происходит обмен между парами НТО в атмосфере и поверхностью воды. При контакте поверхности воды с атмосферой, содержащей пары НТО, тритий поступает в воду и растворяется в ней. Скорость сорбции паров воды линейно зависит от концентрации НТО в воздухе и температуры окружающей среды.

Поскольку вода является основным депо нахождения трития, в природных условиях этот радионуклид отличается исключительно высокой миграционной способностью: он переносится с текущей водой и воздушными испарениями, снеговыми и дождевыми водами на значительные расстояния.

Около 99 % общего количества природного трития превращается в тритиевую воду и участвует в глобальном круговороте воды. Большая часть общего количества трития (65 %) находится в Мировом океане. Поступление трития в океан в составе оксида трития осуществляется с атмосферными осадками, стоком рек и в результате прямого обмена водяного пара между воздухом и морской водой. Попав в океан, тритий рассеивается в нём вследствие перемешивания воды. При попадании оксида трития в поверхностные слои океана часть его снова испаряется в атмосферу, но с меньшей концентрацией радионуклида, другая — постепенно переносится в глубины океана. Концентрация трития в морской воде до начала проведения ядерных взрывов составляла в среднем 0,11 Бк/л, в пресной воде — 0,9–1,7 Бк/л. Эту величину условно можно принять в качестве уровня естественного фона. Общее содержание трития на планете в то время, по оценке разных авторов, составляло примерно $1,8 \text{ кг} (62,9\text{--}296) \cdot 10^{16} \text{ Бк}$ [Моделирование кинетики..., 2000; Моделирование реэмиграции..., 2000; Иваницкая, Малофеева, 2002; Экологические проблемы..., 2003].

Поведение трития в континентальных водах оценивается общими процессами обмена воды в биосфере. В качестве основных учитывают осаждение трития с атмосферными осадками, обмен водяного пара между поверхностью водоёмов, суши и атмосферным воздухом, поверхностный сток, инфильтрацию через почву, взаимодействие и скорость перемещения подземных, грунтовых и поверхностных вод, разбавление примеси в замкнутых и проточных водоёмах.

В зависимости от скорости перемещения водных масс и круговорота воды в биосфере любые типы сброса трития в замкнутые или проточные водные системы в конечном счёте рассеиваются, вплоть до глобального распределения радионуклида.

Прогресс в области физико-математического моделирования стимулировал попытки создать модели поведения трития в объектах окружающей среды [Environmental monitoring..., 1975; Crawford, 1977; Evance et al., 1985; Emergency response..., 1990]. Для этих целей в МАГАТЭ была создана тритиевая рабочая группа BIOMASS (Biosphere Modelling and Assessment), в которую вошли представители России, США, ФРГ, Франции, Великобритании и др. Она разработала типовые модели поведения трития в объектах окружающей среды на основе экспериментальных данных, представленных странами — участницами группы.

Аварийные ситуации с тритием и их последствия рассмотрены в работах [Глобальные выпадения..., 1980; Химическое загрязнение..., 1991; Дудин, 2001; Радиационные и радиозоологические..., 2016]. Сведения о величине аварийных выбросов трития представлены в табл. 1.10.

Оказавшийся в окружающей среде тритий поступает в звенья экологической системы (почвенная вода — растительность — животное — человек), при этом количество выбрасываемого в окружающую среду трития — основной фактор, определяющий его содержание в звеньях экологической системы.

Аварийные выбросы трития

№ п/п	Место аварии	Тип аварии	Последствия аварии
1	Завод Саванна-Ривер, США 1974 г.	Выброс трития в атмосферу $5,1 \cdot 10^5$ Ки	
2	1975 г.	Выброс трития в атмосферу $4,8 \cdot 10^5$ Ки	
3	1983 г.	Выброс трития в атмосферу $5,1 \cdot 10^5$ Ки	Доза на границе завода 0,06 мбэр
4	1984 г.	Выброс трития в атмосферу $5,1 \cdot 10^5$ Ки	Доза на границе завода 0,04 мбэр
5	1989 г.	Выделение трития из первичной системы во вторичную и сброс в реку	Во вторичной системе содержание трития в сотни раз выше нормы
6	Завод ВНИИЭФ, СССР, 1967 г.	Выброс трития в атмосферу $8 \cdot 10^4$ Ки	Доза на границе завода 250* мбэр
7	Ливермская лаборатория США, 1970 г.	Выброс трития в атмосферу $2,9 \cdot 10^5$ Ки	
8	ИТЭР, Кадараш, Франция (прогноз)	Выброс трития в атмосферу $5 \cdot 10^5$ Ки	
9	Ядерная лаборатория Чак Ривер, Онтарио, Канада, 1988 г.	Разлив тяжелой воды в фундаменте реактора 4000 кг	Вода загрязнена тритием

* Выброс трития в форме оксида (НТО).

Между тритием в форме оксида (НТО) и другими звеньями экологической системы достаточно быстро устанавливается равновесие [Moghissi et al., 1971]. Поэтому концентрация трития в любом звене экологической системы не превышает его содержания в воде. Пары НТО поглощаются почвой лучше, чем газообразный тритий. Скорость осаждения НТО на почву составляет 0,35 см/с и практически на порядок превышает скорость осаждения газообразного трития. Газообразный тритий в почве практически мгновенно превращается в оксид за счет каталитического действия микроорганизмов в почве [Moghissi et al., 1971]. Упрощенные пути воздействия на человека выброшенных в атмосферу радиоактивных веществ показаны на рис. 1.13.

Удаление НТО из почвы происходит вследствие испарения, наиболее быстро оно происходит в первые несколько суток после осаждения (от 1 до 18 % в час при температуре 20 °С в зависимости от типа почвы и влажности воздуха [Moghissi et al., 1971]. В дальнейшем интенсивность удаления уменьшается до 0,25–1,5 % в час в связи с заглублением НТО в почву. В период быстрого выведения оксид трития в основном находится в верхнем 10-сантиметровом слое почвы. Характерное проникновение НТО на глубину 10–15 см составит более 100 часов, период полувыведения в начальный момент, в зависимости от влажности и водного режима почвы, изменяется от 7,4 до 27 сут. В этот период

из почвы выводится до 80 % НТО, для оставшихся 20 % характерный период полувыведения составляет 27 месяцев. Более 50 % НТО поглощается на расстоянии до 1000 км от источника выброса, и кинетика процессов обмена почва — воздух должна заметно влиять на содержание НТО в воздухе на расстоянии 100–1000 км. Вблизи источника выброса загрязнение сельскохозяйственных растений и водоёмов может оказаться значительным.

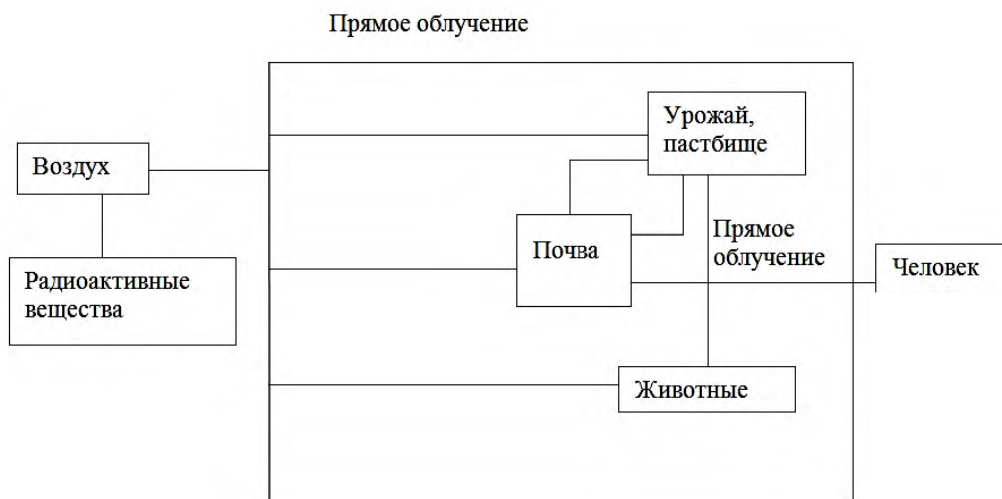


Рис. 1.13. Упрощённые пути воздействия на человека выброшенных в атмосферу радиоактивных веществ

При осаждении НТО в водоёмах происходит быстрое разбавление, и удельная концентрация НТО в парах воды из водоёмов уменьшается, поэтому вторичного загрязнения воздуха практически не происходит. На рис. 1.14 показаны упрощённые пути воздействия на человека радиоактивных веществ, сбрасываемых в грунтовые и поверхностные воды.

Радиоактивные вещества, выбрасываемые в окружающую среду, вовлекаются в сложные серии физических, химических и биологических процессов [Moghissi et al., 1971; Garston, 1979; Богданов, Романовская, 1981]. Некоторые из этих процессов приводят к существенному разбавлению, другие — к физическому или биологическому повторному концентрированию в результате переноса радионуклидов по различным и отчасти независимым путям, ведущим к человеку.

Из представленных путей воздействия на человека выброшенных (сброшенных) в окружающую среду радиоактивных веществ видно, что дозообразующим фактором является облучение — внешнее (прямое) и внутреннее (применительно к НТО) за счёт вдыхания (ингаляция) и потребления загрязнённой воды и пищи.

Любые выбросы радиоактивных веществ в окружающую среду можно разделить на четыре категории [Радиоэкологическая обстановка..., 2015]. Во-первых, различают планируемые и непланируемые выбросы. Планируемые

выбросы ограничены и устанавливаются из непревышения доз облучения населения с учётом всех путей воздействия радионуклидов на человека [Радиационные и радиозэкологические..., 2016]. Непланируемые выбросы учитываются при составлении аварийных планов и могут приводить к превышению пределов доз, установленных для населения.

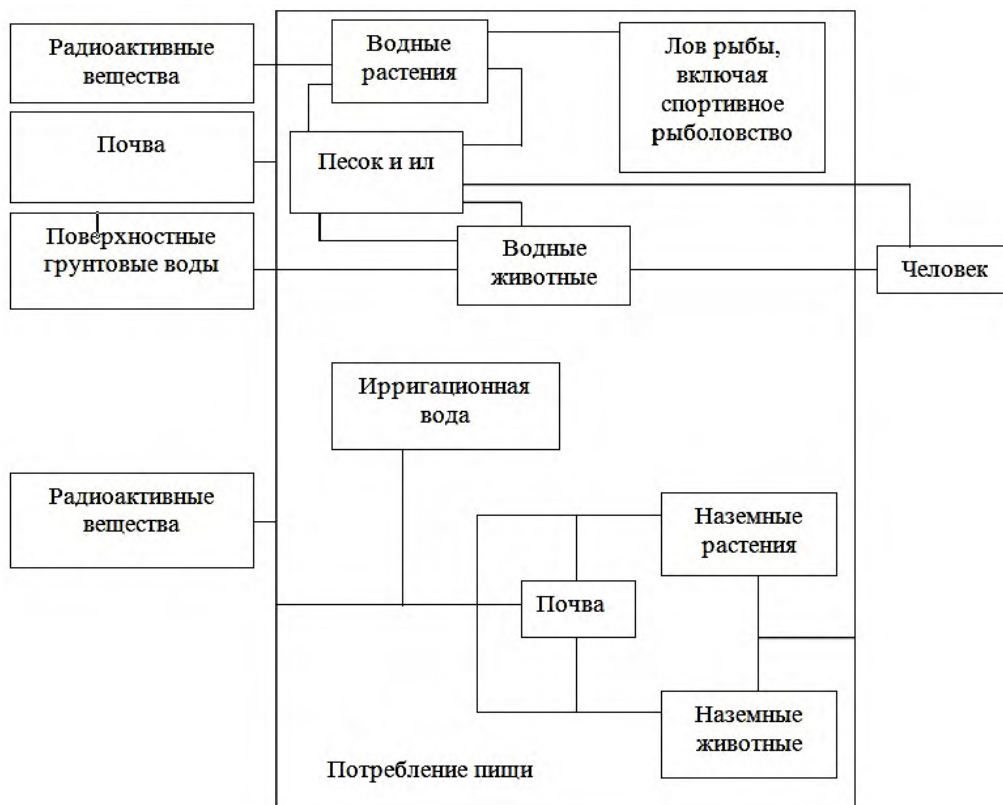


Рис. 1.14. Упрощённые пути воздействия на человека радиоактивных веществ, сбрасываемых в грунтовые воды и поверхностные воды [Богданов, Романовская, 1981]

С 1944 по 1988 гг. на предприятиях, занятых работами с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений, произошло 296 аварий, сопровождавшихся выбросами радиоактивных веществ, в том числе 3 аварии, связанные с выходом трития [Радиационные и радиозэкологические..., 2016].

Что такое авария радиационная? Авария радиационная — это потеря управления источником ионизирующего излучения, вызванная неисправностью оборудования, неправильными действиями работников (персонала), стихийными бедствиями или иными причинами, которые могли привести или привели к облучению людей свыше установленных норм или радиоактивному загрязнению окружающей среды.

Различают следующие типы радиационных аварий [Радиационные и радиозэкологические..., 2016]:

1. Проектная авария — это авария, исходные события которой устанавливаются действующей нормативно-технической документацией данной установки. Для такой аварии техническим проектом предусматривается обеспечение радиационной безопасности персонала и населения. Максимальная проектная авария — проектная авария с наиболее тяжёлым исходным событием, установленным для каждого типа установок, реакторов, производств.

2. Гипотетическая авария — это авария, для которой проектом не предусматриваются технические меры, обеспечивающие радиационную безопасность персонала и населения. Защита персонала и населения в случае гипотетической аварии предусматривается за счёт разработки и осуществления на территории промышленной площадки и окружающей территории плана мероприятий по защите населения и персонала.

По границе распространения выделившихся радиоактивных веществ радиационные аварии классифицируются следующим образом [Радиационные и радиэкологические..., 2016]:

1. Локальная авария — авария в пределах одного помещения (здания, сооружения), не связанная с радиоактивным загрязнением среды за его пределами.

2. Зональная авария — авария с радиоактивным загрязнением местности в пределах санитарно-защитной зоны.

3. Масштабная авария — авария с радиоактивным загрязнением местности за пределами санитарно-защитной зоны.

Классификация атомных аварий по типу в период 1944–1988 гг.

1. Критическое состояние

1.1) агрегатов	5
1.2) реакторов	8
1.3) химических процессов	5

2. Источники излучения **131**

2.1) закрытые	63
2.2) реакторы	14
2.3) химические процессы	1

3. Радиоизотопы

3.1) трансурановые	27
3.2) тритий	3
3.3) продукты деления	10
3.4) утечки радия	2
3.5) диагностика и терапия	23

4. Прочие **4**

Всего **296**

Применительно к содержащим тритий изделиям (СТИ) и их составным частям под аварией понимается повреждение, разрушение или взрыв, сгорание в результате аварийного воздействия, при этом аварийное воздействие — это событие, вызванное попаданием в аварийную ситуацию, которая приводит или может привести к аварии (табл. 1.11).

Последствия возможных аварий с тритием
[Радиационные и радиозэкологические..., 2016]

Тип объекта	Радионуклид	Возможные типы аварий
Производство и переработка трития и его соединений	Тритий	Взрывы, пожары, утечка паров НТО, разрушение оборудования и коммуникаций с выбросом трития в окружающую среду
Сборка-разборка СТИ и его составных частей	То же	Взрывы, пожары, утечка трития из комплектующих составных частей
Транспортирование трития и СТИ	«	Взрывы, пожары, утечка трития из узлов

По условиям возникновения радиационной аварии с СТИ условно подразделяют на четыре типа [Радиационные и радиозэкологические..., 2016]:

I — повреждение СТИ в результате нерегламентированного воздействия на него, приводящее к нарушению целостности изделия;

II — пожар;

III — взрыв;

IV — аварийный взрыв.

Поступление трития в окружающую среду возможно при авариях II–IV типов. Основное радиационное воздействие — внутреннее облучение тритием за счёт его поступления в организм ингаляционным, перкутаным и пероральным путями. Внутреннему облучению подвергается всё тело. Следует отметить, что оксид трития образуется при нахождении СТИ в условиях пожара, когда разгерметизируется узел, содержащий тритий, и выделяющийся тритий окисляется на воздухе до T_2O (НТО, DTO).

Потенциальная опасность радиационного объекта определяется его возможным радиационным воздействием на население при радиационной аварии.

6.2. Выбросы трития из выведённых из эксплуатации реакторов

При исследовании проблем безопасности и здоровья персонала АЭС необходимо учитывать газообразные выбросы, в том числе радионуклида трития. Выбросы радиоактивного трития при выводе из эксплуатации АЭС и переработке отработавшего ядерного топлива огромны — их намного больше, чем радиоактивного углерода ^{14}C . Объёмы выбросов трития примерно на три порядка превосходят выбросы других радионуклидов и в 5 раз превышают ^{14}C .

При выводе из эксплуатации АЭС решение проблемы выбросов трития крайне важно. В специализированной литературе эта тема обсуждается очень редко. У реакторов, остановленных несколько десятилетий назад (30–40 лет) в Великобритании и Канаде, до сих пор наблюдаются значительные выбросы трития. На рис. 1.15 показаны скорости выбросов радионуклидов, в том числе трития, в котельную в выведенном из эксплуатации тяжёловодном реакторе NPD, рассчитанные канадскими ядерными лабораториями.

Демонстрационный реактор типа PHWR мощностью 25 МВт был запущен в 1962 г. на первой АЭС Канады Ролфтон (Rolphton) и проработал до 1987 г. Он стал прототипом серии канадских реакторов CANDU — аналогов французских UNGG и российских РБМК.

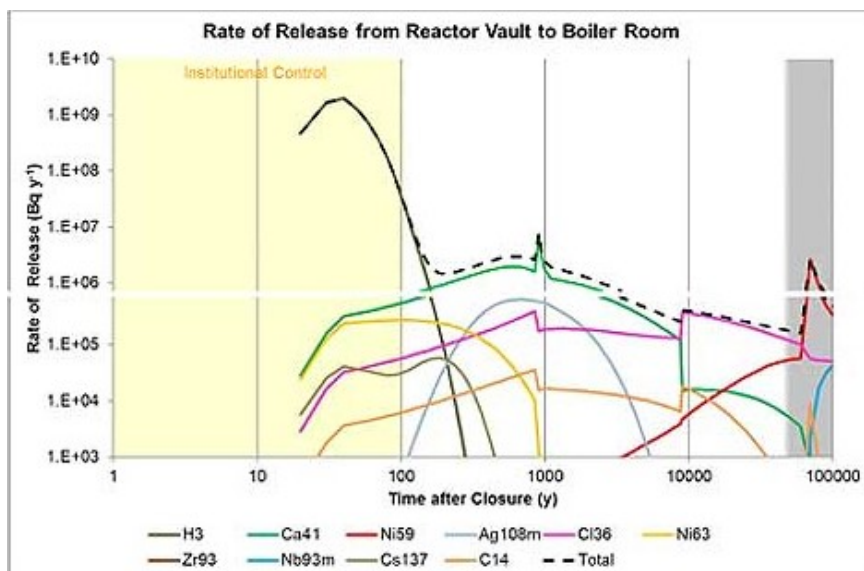


Рис. 1.15. Оценка выбросов радионуклидов из реакторного отсека в котельную, март 2023 г. (технический документ CNL (2016a) WR-1 Reactor Radiological Characterization Summary and Radionuclide Inventory Estimates. WLDP-26100-041-000-0001)

В начале 1990-х гг. в бетонных конструкциях реактора* NPD в Ролфтоне были обнаружены высокие концентрации трития — до 82 000 Бк/г. Для сравнения: концентрации ^{14}C составляли примерно 300 Бк/г [Красная, 1993].

Из представленных диаграмм видно, что скорость выделения трития за первые 100 лет примерно на 3 порядка выше, чем у большинства других радионуклидов, и на 5 порядков больше, чем у ^{14}C . Тритий является наиболее значительным нуклидом, присутствующим в выведенных из эксплуатации реакторах, о чем свидетельствуют его высокие ежегодные выбросы даже через много лет после вывода реактора из эксплуатации.

Высокие концентрации трития в выведенных из эксплуатации реакторах обусловлены [Kim et al., 2008]:

- нейтронной активацией примесей водорода, дейтерия и ^6Li ;
- третичным делением (выход деления < 0,01 %);
- диффузией от высоких уровней трития в охлаждающей воде и замедлителе.

По приведённому в работе [Kim, 2009] выводу: «в течение всего срока службы ядерных объектов тритий диффундирует в ткань зданий. При проведении работ по выводу из эксплуатации ОИАЭ и экологической экспертизе необходимо точно оценивать активность трития в широком спектре материалов до вынесения заключения по любым отходам».

* Реактор был остановлен в 1987 г. с удалением топлива.

Обычные компьютерные модели могут давать неточные прогнозы содержания трития в выведённых из эксплуатации реакторах. Так, согласно [Corcoran et al., 2017], «стальные резервуары для хранения, используемые в течение более 20 лет, показывают концентрацию трития, значительно превышающую предсказанную, исходя из расчета простого газового раствора в исходном металле».

Исследования материалов сосудов указывают на существование двух основных источников трития [Corcoran et al., 2017]:

- 1) объёмного металла, где глубинное загрязнение возникает в результате диффузии/растворения;
- 2) высокоактивного поверхностного слоя, содержащего основное количество трития.

Модели, основанные только на кодах активации нейтронов, могут неверно предсказывать уровни загрязнения тритием. «Без понимания того, что в конкретных реакторах существуют две формы трития, содержание ^3H в образцах может быть сильно занижено при использовании традиционных аналитических подходов. Эти две формы — сильносвязанный тритий и слабосвязанный тритий. Первый возникает из захвата нейтронов, главным образом, на следе (1 часть на 20 000) ^6Li в минеральных фазах и требует температур, превышающих $800\text{ }^\circ\text{C}$ для достижения количественного восстановления. Слабосвязанная форма трития может выделяться при более низких температурах ($100\text{ }^\circ\text{C}$) в виде тритиевого водяного пара НТО и связана с дегидратацией гидрозных минеральных компонентов» [Kim et al., 2008].

В металлах тритий удерживается поглощением свободной воды в гидратированном поверхностном слое окисления, попаданием Н в объёмный металл, а также в виде связанного с решеткой трития, образующегося при нейтронной активации [Nishikawa et al., 2006].

Кроме того, было обнаружено, что значительное количество трития включается в необлучённые металлы (например, нержавеющую сталь и медь) после длительного воздействия тритиевого водяного пара (НТО) и/или тритий-водородного газа (НТ) на ядерных установках. В облучённых металлах в результате реакций захвата нейтронов внутри образовался дополнительный тип трития. Образующееся количество зависело от концентрации и распределения следа лития и бора в металле.

Компьютерные модели часто используют неконсервативные допущения. Например, используют измеренные уровни нуклидов конкретных биополей на их внешних поверхностях, то есть там, где существуют самые низкие уровни, в то время как самые высокие уровни находятся ближе всего к активной зоне реактора.

«Эти результаты иллюстрируют необходимость разработки надёжных процедур оценки радиоактивных отходов для программ вывода из эксплуатации ядерных установок» [Kim et al., 2008].

6.3. Мониторинг содержания трития

Основные формы соединений трития, поступающего в окружающую среду от предприятий ЯТЦ: тритиевая вода (НТО), тритиевый водород (НТ) и тритиевый метан (CH_3T). Последние два удерживаются в атмосфере в течение 5–10 лет, после чего в результате переработки бактериями и фотохимического окисления превращаются в тритиевую воду. Таким образом, в настоящее время

тритиевая вода — наиболее распространённая форма соединений трития на Земле [Garston, 1979].

Наблюдения за содержанием трития в природных средах проводятся уже многие годы, начиная с первых испытаний ядерного оружия. По предложению МАГАТЭ/ВМО наблюдения за содержанием трития в атмосферных осадках ведутся в 65 странах мира.

В настоящее время во всём мире действует несколько крупных заводов по переработке ядерного топлива, например, такие как радиохимический завод в Саванна-Ривер (США), Селлафилде (Англия), а также заводы на мысе Аг и в Маркуле (Франция) и более 500 больших реакторов в 35 странах мира.

Мониторинговые работы в окрестностях Национальной лаборатории меченых препаратов (NTLF) в районе г. Беркли (США) в 1984–1990 гг. показали, что концентрация трития в природной воде превышает уровень глобального фона данной местности. В 1990 г. содержание радионуклида в грунтовой воде вблизи лаборатории составляло 700–1330 Бк/л, что в целом превышало установленный допустимый предел для питьевой воды (740 Бк/л) в этой стране. Средняя эмиссия радионуклида от предприятия в окружающую среду составляла $3,7 \cdot 10^{12}$ Бк/год [Report..., 2002].

В районе завода по переработке ядерного горючего Саванна-Ривер (США) в 2000–2002 гг. концентрация трития в речной воде варьировала от 40 до 500 Бк/л, в питьевой — от 30 до 85 Бк/л (Report..., 2002).

В окрестностях тяжеловодного реактора в AECL-Chalk River Laboratories (штат Онтарио, Канада) на разном расстоянии от реактора (10–200 км) концентрация трития изменялась от 6,5 до 15,9 Бк/л. В моче сотрудников лаборатории удельная активность радионуклида варьировала от 32 до 92 кБк/л в зависимости от уровня содержания трития на рабочем месте [Report..., 2002]. В грунтовых водах, район расположения реакторов Hydro CANDU, штат Онтарио, в 1979 г. были зарегистрированы высокие концентрации трития — 215 кБк/л, в 1994 г. этот показатель снизился до 70 000 Бк/л [Ontario drinking..., 2009].

В окрестностях г. Фукуи (Япония), в районах размещения энергетических установок, обнаружены сравнительно низкие концентрации трития в поверхностных водах (1,2–1,5 Бк/л), дождевых водах (1–7 Бк/л) и в воздухе (1–18 Бк/л) [Report..., 2002]. Наблюдения за содержанием трития в окрестности г. Чернавода (Румыния), где с 1996 г. функционирует реактор CANDU6, показали, что концентрация трития в образцах воды в предпусковой период составляла 3 Бк/л. За время эксплуатации реактора содержание радионуклида в воздухе, почве и растительности на расстоянии до 3 км от источника увеличилось в несколько раз по сравнению с предшествующим периодом [Report..., 2002].

Концентрация трития в воде озера, расположенного в районе Ок-Риджа (США), изменялась в диапазоне от 1,5 до 22 кБк/л. Содержание трития в поверхностных водах вблизи источников загрязнения достигает 1–20 кБк/л [Report..., 2002].

В настоящее время внимание к определению содержания трития в природных водах не ослабевает в связи с тем, что в окружающую среду поступает значительное количество трития при мирном использовании ядерной энергии. В будущем получение энергии на термоядерных реакторах может также привести к значительному накоплению трития в биосфере, так как предполагается, что термоядерный реактор будет выделять трития в 10^4 – 10^5 раз больше

по сравнению с АЭС при эквивалентной мощности и что к 2100 г. равновесное содержание трития в атмо- и биосфере Земли составит примерно $2,5 \cdot 10^{22}$ Бк.

Большое значение уделяется изучению механизмов и качественных закономерностей накопления и выведения трития в различных звеньях наземной и водной экологических цепочек. Так, например, показано, что содержание трития в растительности и почве находится в прямой зависимости от концентрации паров трития в атмосфере, скорости осадения НТО на земную поверхность, количества выпадающих атмосферных осадков и в обратной зависимости от эвапотранспирации, когда поток НТО направляется восходящим путём из растения в атмосферу.

В натуральных условиях содержание в растительности и почве, как правило, не одинаково и наблюдается соотношение

$$\frac{\text{НТО в свободной воде}}{\text{НТО в свободной воде почвы}} > 1,$$

при преобладании процесса усвоения паров окиси трития растительностью из атмосферной влаги. И это соотношение менее 1, если преобладает усвоение НТО корневой системой растения из почвенной влаги. Помимо трития, находящегося в свободной воде растений, некоторое количество является частью органических структур и составляет так называемый «органически связанный» тритий. При разовом поступлении трития отношение удельных активностей этого нуклида в органической фракции и в свободной воде растения равно примерно 0,05.

Существующий регламент и системы контроля трития не обеспечивают контроль ОСТ в воздухе. В воздухе контролируется только тритий в виде НТ и, как следствие частичного замещения водорода тритием в воде, НТО во влаге воздуха. Кроме трития, ОСТ содержит углерод и кислород, так как тритий замещает водород в первую очередь в цепочке О-Н. В сбросах французских АЭС углерод (С-14) и тритий измеряют всегда вместе. В США, Канаде и некоторых других странах в районах размещения ядерных объектов также проводится одновременный мониторинг трития и углерода-14, целью которого является исследование значимости ОСТ с учётом продолжительности времени его удержания в живых организмах. В России такие работы ведутся в Федеральном медико-биологическом центре (ФМБЦ) имени А.И. Бурназяна [Радиобиология инкорпорированных..., 2016; Юхимчук, 2019].

Характеристикой воздействия источника внутреннего облучения является величина активности соединений трития, поступивших в течение года в организм человека с воздухом рабочих помещений через органы дыхания и через кожу тела: газа НТ, аэрозолей с тритидами металлов, паров тритированной воды с НТО, соединений ОСТ. Величина этого поступления определяет годовую эффективность дозы внутреннего облучения D :

$$D = \sum \Pi_i \cdot \Phi_i,$$

где D — суммарная эффективная доза от поступления соединений трития в организм, Зв; Π_i — величина активности i -го соединения трития, поступившего в организм человека в течение года, Бк/год, $i = 1, 2, 3, 4$ (для НТ, НТО, ОСТ и аэрозолей с тритидами металлов); Φ_i — дозовый фактор для i -го соединения трития, Зв/Бк [Балонов, 1983].

В качестве наиболее критичной дозы для населения выделяется доза от перорального поступления ОСТ:

$$D^{\text{ОСТ}} = \text{ПФ} = C^{\text{ОСТ}} M \Phi^{\text{ОСТ}},$$

где $C^{\text{ОСТ}}$ — среднегодовое содержание ОСТ в продуктах, Бк/кг; M — суммарное годовое поступление продуктов, кг/год; $\Phi^{\text{ОСТ}}$ — $1,2 \cdot 10^{-10}$ Зв/Бк (из НРБ-99/09 для ОСТ).

Годовое потребление продуктов можно принять в соответствии с данными Единой межведомственной информационно-статистической системы (табл. 1.12).

Таблица 1.12

Годовое потребление продуктов питания на душу населения для Саратовской, Тверской и Ростовской областей, 2012 г.

АЭС	Годовое потребление на душу населения, кг/год			Сумма, кг/год
	Хлеб, крупы	Мясо, рыба	Овощи, фрукты	
Балаковская	309	68	154	531
Калининская	278	70	176	524
Ростовская	278	71	213	562

Оксид трития могут накапливать не только продукты, выращенные на заражённой местности, но и «чистые» продукты, хранящиеся в атмосфере, загрязнённой НТО. Поступление НТО в продукты будет происходить за счёт обмена содержащей НТО атмосферной влаги и воды, содержащейся в продуктах.

Для Балаковской АЭС годовое поступление трития в форме ОСТ в продуктах питания при среднегодовом содержании $C^{\text{ОСТ}}$, равном 100 Бк/кг, составляет 53,1 кБк, тогда как для населения $D^{\text{ОСТ}}$ равна 6,4 мкЗв/год.

В то же время годовое ингаляционное поступление трития при объёмной активности ОСТ 1 Бк/м³ (соответствует ~100 Бк/л во влаге воздуха) оценивается в 8,1 кБк, то есть примерно в 7 раз меньше, чем при пероральном поступлении. В табл. 1.13 приведены данные исследований распределения трития в продуктах питания человека [Балонов, 1983].

Результаты изучения поведения трития в водной экосистеме показали, что концентрация трития в свободной воде тканей водных организмов следует за изменением концентрации трития в окружающей воде водоёма.

Отношение

$$\frac{\text{НТО в свободной воде тканей}}{\text{НТО/л в свободной воде водоёма}} = 0,8 - 1,02,$$

соответствует почти для всех видов гидробионтов.

Поступление трития в свободную воду тканей рыб происходит очень быстро. В лабораторном эксперименте [Bondareva, Schultz, 2015] было установлено, что через полтора часа концентрация трития в воде тканей рыбы достигала того же уровня, что и концентрация в аквариумной воде. Скорость выведения трития из свободной воды тканей рыб также оказалась очень высокой.

Через 15 минут после пересадки рыбы в аквариум с чистой водой она теряла 50 % содержащегося в ней трития.

Таблица 1.13

Тритий в пище и человеке, г. Акита (Япония)

Вид пробы	Тритий в свободной воде пробы, Бк/л	Органически связанный тритий, Бк/л	Суточное поступление трития, Бк/сут
Сырая пища			
рис	2,5	1,8	0,279
овощи	1,0–1,4	1,7–1,8	0,307
рыба, моллюски	0,49	1,0	0,055
мясо	1,3	1,8	0,094
молоко	2,0	2,1	0,241
яйца	1,7	2,1	0,068
Водопроводная вода	1,9	–	2,25
Суточное поступление			
человек	1,7	1,9	
мозг	1,6	1,7	
лёгкие	1,6	1,9	
печень	1,6	1,8	

Переход НТО в органически связанную воду происходит гораздо медленнее. Через 15 дней концентрация органически связанного трития в тканях рыб достигала 15 % от содержания его в окружающей воде.

Соотношение

$$\frac{\text{Органически связанный НТО в водной биоте}}{\text{НТО в воде озера}} = 0,25 - 0,685.$$

Тритий, находящийся в органически связанном виде, имеет более длительный период биологического полувыведения (до 1000 дней).

Обобщая литературные данные о загрязнении внешней среды тритием, следует заключить следующее: тритий распространяется на десятки километров от источника выброса и быстро включается в состав свободной воды тканей различных биологических объектов. Установление соотношений между содержанием трития в различных компонентах биосферы показало, что в большинстве случаев концентрация трития во влаге атмосферного воздуха больше, чем в дождевых осадках, а в свободной воде растений она может быть выше, чем в почве.

В то же время требования к чистоте окружающей среды становятся всё более строгими. Уровни вмешательства для трития в питьевой воде по НРБ-99 и ОСПОРБ-99, составляющие 7700 Бк/л, примерно в 10 раз более жёсткие по сравнению с НРБ-96 и примерно в 50 раз более жёсткие по сравнению с НРБ-86/87. Однако в Евросоюзе, США, Японии законодательно приняты допустимые нормы содержания трития в питьевой воде (100 Бк/л). Министерством охраны

окружающей среды одной из провинций Канады (Онтарио) было рекомендовано введение допустимых пределов содержания трития на уровне 20 Бк/л [Weinberg, 1981; Ontario drinking..., 2009].

Глава 7. Методы измерения трития. Отбор и пробоподготовка

7.1. Методы измерения трития

Измерение малых концентраций природного трития и низкая энергия его β -частиц вызывает определённые технические трудности: малая энергия излучения трития не позволяет использовать пробы большого объёма вследствие поглощения излучения веществом пробы, а низкая массовая концентрация трития в исследуемых образцах не может быть увеличена химическими методами. Всё это требует применения таких методов радиометрии, которые обладают высокой эффективностью измерения мягкого β -излучения, низким фоном и хорошей стабильностью аппаратуры [Ломоносов, Сошин, 1968].

Физические свойства трития исключают применение каких-либо плёнок, отделяющих измеряемый объект от рабочей части детектора, что, в свою очередь, определяет специфику аппаратуры для регистрации излучения трития. Кроме того, осложнение регистрации этого изотопа вызывает собственное излучение трития, ускоряющее образование различных химических соединений, изотопный обмен, сорбцию трития [Методы измерения..., 1978].

Выбор того или иного подхода к измерениям определяется степенью сложности метода, относительной стоимостью методов и точностью требуемой обработки (Методы измерения..., 1978). Экспрессные методы легко реализовать для непрерывного контроля, а методы, требующие более сложной и точной обработки, гораздо целесообразнее применять при дискретном анализе, чему примером может служить жидкостная сцинтилляционная радиометрия.

Содержание трития в различных средах определяют измерением его активности, чаще всего ионизационными и сцинтилляционными методами (табл. 1.14). При недостаточной чувствительности измерительной аппаратуры применяют методы предварительного концентрирования (термодиффузия, ректификация, электролиз).

Таблица 1.14

Характеристика наиболее употребляемых методов определения трития

Детектор	Минимальная детектируемая активность трития, Бк	Пределы измерения концентрации трития в воде, Бк/л
Пропорциональный счётчик	$3,7 \cdot 10^{-2}$	$3,7 \cdot (10-10^6)$
Счётчик Гейгера — Мюллера	$3,7 \cdot 10^{-2}$	$18,5-3,7 \cdot 10^5$
Жидкостной сцинтилляционный счётчик совпадений	0,37	$1,85 \cdot 10^2-3,7 \cdot 10^8$
Ионизационная камера	$3,7 \cdot 10^2$	$1,85 \cdot 10^5-3,7 \cdot 10^{14}$

Для контроля за содержанием трития в воздухе используют:

- ионизационные камеры — диапазон измеряемых концентраций $3,7 \cdot (10-10^{13})$ Бк/л;
- пропорциональные — $1,85-3,7 \cdot 10^6$ Бк/л и сцинтилляционные счётчики — $3,7 \cdot (10-10^7)$ Бк/л;
- фотоплёнки — для периодического контроля.

Известные методы определения трития, входящего в состав воды или водной фазы природных объектов, связаны либо с химическим разложением воды, либо с прямым измерением трития в воде.

Определение содержания трития в различных средах основано на измерении его активности ионизационными или сцинтилляционными методами, а также на использовании других физико-химических свойств этого нуклида с помощью масс-спектрометрических, калориметрических, фотографических и иных методов.

Ионизационный метод имеет высокую чувствительность, измерение трития можно проводить в очень широком диапазоне величин, но при использовании данного метода необходимо превращать тритийсодержащие образцы в газ, что требует осторожного обращения при наполнении ионизационной камеры и является существенным недостатком метода. Поэтому ионизационные камеры используют преимущественно для измерения трития в газовых средах, которые вводятся во внутренний объём камеры. На своем пути в воздухе β -частица образует определённое количество пар ионов. При полном собирании этих ионов в ионизационной камере может быть получен импульс напряжения порядка 1 мкВ. Наиболее часто тритий вводят в камеру (помимо воздуха) в смеси с водородом или в виде паров воды [Беловодский и др., 1985].

Для измерения трития в газовых смесях используют также газоразрядные счётчики (пропорциональные и Гейгера). Конструктивно пропорциональные счётчики и счётчики Гейгера почти не отличаются, они различаются только режимом работы, то есть приложенным напряжением и, как следствие, измерительной аппаратурой.

При измерении удельной активности трития в составе паров воды применяют счётчики внутреннего наполнения (Ломоносов, Сошин, 1968, Методы измерения..., 1978) и рабочую смесь (например, пропан + бутан + гелий). Предел чувствительности — от 1 до 10^2 Бк/л воды. В некоторых случаях открытые ионизационные камеры применяют для контроля содержания трития в твёрдых образцах (на поверхностях).

К достоинствам счётчика Гейгера и пропорционального счётчика относятся короткое «мёртвое время» и большая скорость счёта, однако измерение активности трития счётчиками, как и ионизационными камерами, имеет свои недостатки, главными из которых являются: 1) довольно трудоёмкие операции по подготовке образца, 2) загрязнение образцов в счётных трубах и 3) так называемые эффекты «памяти» во внутренних счётчиках газа.

Фотографический метод основан на почернении фотоэмульсии при поглощении в ней β -частиц трития. Пробег последних в фотографической эмульсии составляет 1 мкм, в связи с этим тритий представляет собой идеальный радионуклид для метода автордиографии с высокой разрешающей способностью. Но на почернение плёнок и эмульсии влияют многие факторы (температура, условия проявления, время выдержки плёнки после контакта с образцом и др.), поэтому количественные измерения трития этим методом практикуются редко.

Масс-спектрометрический метод применяется для изотопного и химического анализа газовых смесей, содержащих тритий, а также другие примеси газов в широком диапазоне концентраций и соотношений [Mass Spectrometry..., 2004]. Этот метод позволяет проводить анализы с количеством смеси, примерно равным 10^{-5} см³, при условии, что активность трития составляет $7,4 \cdot 10^3$ Бк в смеси.

Метод жидкостной β -сцинтилляции является наиболее универсальным.

Сцинтилляционный метод исследования радиоактивных процессов, первоначально основанный на визуальном счёте сцинтилляций, широко применяется при изучении параметров ионизирующих излучений благодаря изобретению в 1946 г. детектора типа сцинтиллятор — фотоэлектронный умножитель. Свойственные данному типу детекторов специфические характеристики, такие как усиление сигнала до 10^4 – 10^8 , площадь входного окна (сотни квадратных сантиметров), хорошее спектральное согласование области фоточувствительности фотоэлектромножителей (ФЭУ) с излучением высокоэффективных сцинтилляторов, обеспечивают им устойчивое применение в ядерной физике, биологии, медицине и экологии [Гринев и др., 2007].

Сцинтилляционный метод основан на преобразовании энергии β -излучения в фотоэлектроны, вызывающие импульсы напряжения в ФЭУ, которые подсчитывают специальной считывающей схемой [Сцинтилляционный..., 1961; Методы измерения..., 1978; Applying direct..., 2009].

Так как сложность измерения содержания трития обусловлена низкой энергией испускаемого β -излучения [Perkin Elmer..., 2000b], для измерения β -частиц трития детектор должен быть удалён от источника не более чем на $0,1$ мг·см⁻². В воде, например, это расстояние не должно превышать 1 мкм. Поэтому проба большого объёма в жидком состоянии доступна для измерений только при использовании детектора с большой чувствительной поверхностью или при смешивании её с жидким детектором, то есть с жидким сцинтиллятором [Шрам, Ломбер, 1967; Perkin Elmer..., 2000a].

При взаимодействии регистрируемых частиц и квантов с веществом сцинтиллятора в последнем возникают световые вспышки — сцинтилляции. В упрощённом виде процесс сцинтилляции состоит из трёх стадий (Эванс, 1970):

1) β -излучение изотопа проникает в сцинтиллирующий растворитель (объёмом молекул источника излучения можно пренебречь), где проявляется в виде энергии ионизации, диссоциации или возбуждения молекул раствора. Энергия электронного возбуждения раствора более всего способствует появлению светового излучения;

2) энергия возбуждения раствора передаётся затем молекулам первичного растворенного вещества, представляющего собой какое-либо флюоресцирующее соединение;

3) возбужденные молекулы флюоресцирующего вещества возвращаются в исходное состояние, испуская квант света в видимой или близкой ультрафиолетовой области.

Стадии данного процесса приведены на рис. 1.16.

Таким образом, наиболее простой непосредственный контакт может быть достигнут при растворении пробы в жидком сцинтилляторе. Обычно жидкий сцинтиллятор состоит из растворителя, активатора и смесителя спектра,

концентрация двух последних составляет единицы и доли грамма на литр растворителя [Perkin Elmer..., 2000a].



Рис. 1.16. Механизм передачи возбуждения в молекулах сцинтиллирующего коктейля

Практически вся энергия β -излучения трития расходуется на ионизацию и возбуждение молекул компонентов, входящих в состав сцинтиллятора. Количество световых вспышек, испускаемых растворенными веществами при переходе из возбуждённого в основное состояние, пропорционально числу β -частиц, поглощённых сцинтиллятором. Поэтому β -излучение трития взаимодействует в основном с молекулами растворителя и возбуждает их. Возбуждение в растворителе передаётся от молекулы к молекуле до тех пор, пока не локализуется на молекуле активатора. При переходе молекулы активатора в основное состояние энергия возбуждения частично может выделяться в виде светового кванта [Brown, 1995]. Только примерно 5 % общей энергии β -излучения преобразуется в свет, остальная энергия вырождается в кванты более низкой энергии или расходуется на химические превращения. Если оптический спектр сцинтилляций не совпадает с областью максимальной спектральной чувствительности применённого фотоэлектромножителя, в сцинтиллятор вводят смеситель спектра. Смесителю спектра передаётся энергия возбуждения от активатора, а затем отдаётся в виде светового кванта другой более длинной волны, близкой к области максимальной чувствительности ФЭУ. Образующиеся световые вспышки регистрируются (ФЭУ) спектрометра. Введение β -излучателя в состав жидкого сцинтиллятора обеспечивает геометрию счёта 4π , что увеличивает чувствительность метода. Если в сцинтилляторе присутствует вещество, которое способно изменить интенсивность отдельной световой вспышки, в сцинтиллятор вводят промежуточный (вторичный) растворитель. Такой растворитель, по сравнению с исходным, более эффективно передаёт активатору первоначальную поглощённую энергию.

Энергетический выход у жидких сцинтилляторов достаточно низкий и составляет примерно $12,5 E_\beta$, где E_β — энергия β -частицы, кэВ. В результате на первый диод ФЭУ в лучшем случае приходит от 2 до 10 электронов. Из-за малых амплитуд сцинтилляций качество счётчика в значительной мере определяется фотоумножителем. Поэтому умножители, которые применяют для измерения трития, должны обладать рядом специальных свойств [Эванс, 1970]: 1) максимальная чувствительность фотокатода, 2) большой коэффициент умножения, 3) малый уровень шумов, 4) высокая стабильность как коэффициента усиления, так и уровня собственных шумов и 5) отсутствие радиоактивных загрязнений в конструкционных материалах.

В качестве растворителей в жидких сцинтилляторах широко используются ксилол ($C_6H_4(CH_3)_2$), толуол (C_7H_8), диоксан ($C_4H_8O_2$), который подходит для водных проб, так как хорошо растворяет воду [Perkin Elmer, 2000a]. Хорошую

сцинтилляционную эффективность имеют такие сцинтиллирующие вещества (активаторы), как 2,5-дифенилоксазол (PPO) — $C_{15}H_{11}NO$ и *n*-терфенил — $C_{18}H_{14}$, смеситель спектра 1,4-ди-2-(5-фенилоксазолин)-бензол (POPOP) — $C_{24}H_{16}N_2O_2$, вторичный растворитель — нафталин сублимированный [Brown, 1995; Tritium in a pine..., 2000].

Очень много проблем возникает при измерении органически связанного трития, особенно при низких уровнях активности в пробах. Многие авторы [Garland, Ameen, 1979; Garland, Cox, 1982; Rank, 1987; Brown, 1995; Pointurier et al., 2003] указывают на возможность перекрёстного загрязнения проб, а также загрязнения в результате обмена с атмосферой в лаборатории, особенно если содержание трития в атмосфере лаборатории выше нормального уровня. Как подчеркнул Дж. Макфарлейн [McFarlane, 1976], возможная реакция обмена между атомами водорода воды и обменного органического атома водорода является основным источником ошибки в определении биологического трития. По этой причине, несмотря на возможные изменения за счёт длительного увлажнения и сушки, считается, что помимо принятия необходимых мер предосторожности в отношении атмосферного загрязнения необходимо выделить максимально полнообменный тритий [3He mass spectrometry..., 2010].

После выделения и предварительной подготовки проб, содержащих органический тритий, используют методы измерения содержания трития те же, что и при измерении НТО.

Различают основные этапы для определения содержания ОСТ в объектах окружающей среды [Packard Instrument..., 1995; Radioactive Measurement..., 1997; Tritium in plants..., 2009]:

1. НТО-фракция — дистилляция или сушка вымораживанием образца.
2. Общий тритий — сжигание образца при температуре 750 °С с катализатором.

Обе фракции измеряются отдельно. Содержание ОСТ рассчитывается как разница между первой и второй фракциями. В этом случае необходимо использование стандарта, содержащего тритий, так как химический выход может быть меньше 100 %.

В качестве тритийсодержащего стандарта используется главным образом [$6-^3H$]-тимидин, который имеет ряд преимуществ по сравнению с другими стандартами (Методы измерения..., 1978; Методические указания..., 2002).

Кроме того, для выделения ОСТ используют метод отгонки азеотропной смеси с органическими растворителями, имеющими низкую растворимость в воде. Это могут быть такие растворители, как *o*-, *p*- или *n*-ксилол, циклогексан, толуол. В Методических указаниях [2002] использовался циклогексан, который смешивался с сухим биологическим материалом. После установления равновесия с образцом азеотропная смесь отгонялась на вращающемся испарителе при температуре 70 °С.

Для исследований могут применяться различные типы проб, например, вода из различных источников (дождевая, дистиллированная, морская, водопроводная, речная), поэтому коктейль должен быть унифицирован для всего многообразия изучаемых образцов. Кроме того, в зависимости от типа исследуемого объекта могут изменяться оптимальные условия для приготовления смеси *проба — коктейль*. Варьируют такие параметры, как температура смеси и объём пробы (рис. 1.17) [Бондарева, Помозова, 2009].

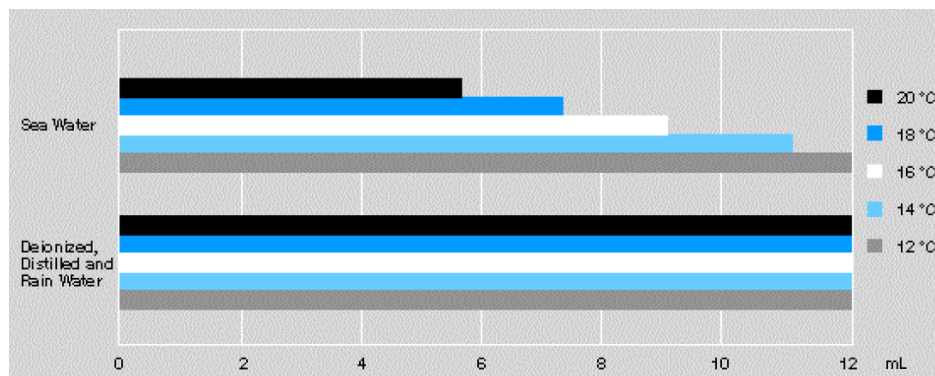


Рис. 1.17. Зависимость объёма воды в смеси (при добавлении к 10 мл коктейля) при различных температурах для разных типов воды

Кроме того, коктейль должен соответствовать всем требованиям безопасности, а именно: иметь высокую температуру воспламенения, не проникать сквозь материал, из которого изготовлены виалы, быть разлагаемым микроорганизмами, а также низкотоксичным [Perkin Elmer..., 2000a]. Также при подготовке проб уделяется значительное внимание материалу, из которого изготовлены виалы.

В последнее время большее предпочтение отдается пластиковым виалам, поскольку они, в отличие от стеклянных, более устойчивы к механическим повреждениям и это делает их более удобными в эксплуатации в лабораторных условиях. Более того, процесс утилизации пластиковых виал сопряжён с меньшими трудностями [Perkin Elmer..., 2000a].

В связи с тем, что энергия β -излучения трития низкая, на сцинтилляцию влияет большое число факторов. При работе следует учитывать, что введение в жидкий сцинтиллятор исследуемых проб и наличие в нём механических примесей снижает эффективность регистрации жидким сцинтиллятором из-за тушения (или гашения) сцинтилляций.

Тушение — это уменьшение общего выхода фотонов измеряемого образца как результат уменьшения эффективности передачи энергии. Из-за тушения спектр энергии радионуклида выглядит сдвинутым в сторону низких энергий (рис. 1.18).

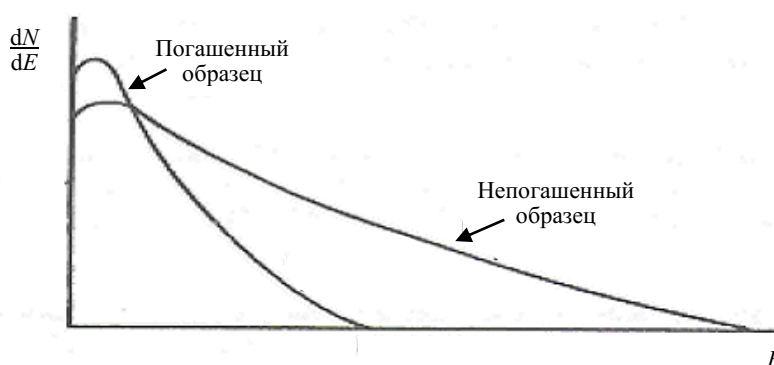


Рис. 1.18. Пример сдвига спектра при тушении (Quenched) относительно нетушенного (Unquenched) образца [Packard Instrument..., 1995]

Существует четыре основных типа тушения:

1. Химическое, или примесное, — происходит при неполной очистке измеряемых образцов от солей или же при дополнительном внесении примесей при подготовке образцов к измерениям. Величина химического тушения зависит от концентрации солевых примесей в образце.

2. Оптическое, или цветное, — происходит при наличии окрашивания измеряемых образцов. Это является причиной затухания фотонов, производимых в растворённом веществе. Величина цветового тушения зависит от интенсивности окраски мешающего химического реагента и длины траектории, которую должен пройти фотон.

Химическое тушение поглощает энергию β -частиц до их превращения в фотоны, в то время как цветное тушение происходит в процессе прохождения непосредственно фотона через среду [Packard Instrument..., 1995]. На рис. 1.19 приведены примеры сдвигов спектров при химическом и оптическом тушении жидкого образца.

3. Вода, вводимая в жидкий сцинтиллятор, способна значительно снизить эффективность измерений за счёт уменьшения интенсивности световых вспышек [Perkin Elmer..., 2000a].

4. В некоторых случаях (например, при исследованиях твёрдых веществ) на эффективность измерения в значительной степени может влиять неоднородность (гетерогенность) пробы. Для гетерогенной пробы за счёт осаждения взвешенных частиц, содержащих в том числе и тритий на стенки и дно виалы, зона излучения представляет собой полусферу, площадь поверхности которой равна $2\pi r^2$, тогда как для гомогенного раствора зоной излучения является сфера с площадью $4\pi r^2$ (рис. 1.20).

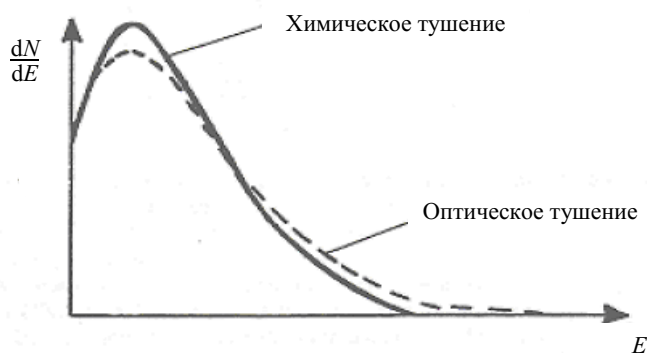


Рис. 1.19. Примеры сдвигов спектров при химическом и оптическом тушении [Packard Instrument..., 1995]

Величина тушения характеризуется таким параметром, как индекс тушения $tSIE$, который является безразмерной величиной и рассчитывается с помощью программного обеспечения спектрометра. Для трития зависимость эффективности измерения от индекса тушения представляет собой логарифмическую кривую (рис. 1.21).

Бета-излучение изотопа проникает в сцинтиллирующий растворитель, где проявляется в виде энергии ионизации, диссоциации или возбуждения молекул раствора. Энергия электронного возбуждения раствора более всего способствует

появлению светового излучения и передаётся затем молекулам первичного растворённого вещества, представляющего собой флуоресцирующее соединение. Возбуждённые молекулы флуоресцирующего вещества возвращаются в исходное состояние, испуская квант света в видимой или близкой ультрафиолетовой области. В растворе присутствует вторичное растворённое вещество (также флуоресцент), которое способно поглощать этот свет, а затем излучать его с большой длиной волны. Этим достигается лучшее согласование между эмиссионным спектром считываемого образца и спектральным ответом фотокатода, детектирующего излучение. Лишь около 5 % общей энергии β -излучения преобразуется в свет, остальная энергия вырождается в кванты более низкой энергии или расходуется на химические превращения.

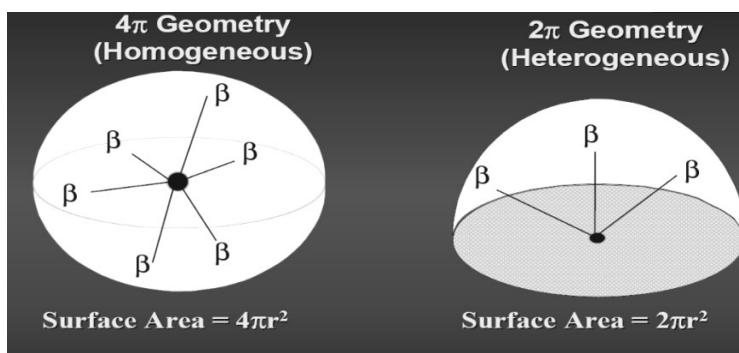


Рис. 1.20. Зоны действия излучения в гомо- и гетерогенном растворах [Perkin Elmer..., 2000a]

tSIE	Ch A
518	48
430	45
341	39
279	33
219	27
169	20
123	14
86,3	9
45,2	3
17,9	0

Ch A — 0,0–18,6

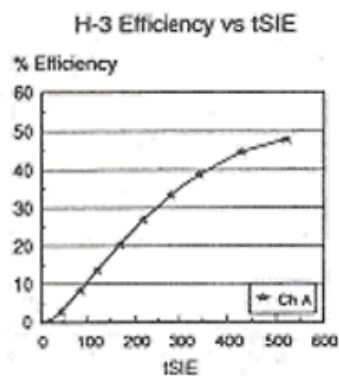


Рис. 1.21. Зависимость эффективности измерения трития в образцах от индекса тушения [Perkin Elmer..., 2000a; Бондарева, Помозова, 2009]

Таким образом, сцинтиляционный метод с использованием современных, сложных и весьма дорогих жидкостных радиометров с активной защитой позволяет определять низкие удельные активности трития в воде и других объектах окружающей среды вплоть до 0,1 Бк/л. А метод определения трития, основанный на использовании жидких сцинтилляторов, универсален

в применении, прост в работе, характеризуется высокой производительностью и используется при массовом анализе.

7.2. Методы отбора и подготовки проб для определения содержания окиси трития в приземном атмосферном воздухе и воде

В практике дозиметрии, наряду с непрерывным контролем трития и НТО в воздухе, часто применяют методы, основанные на периодическом отборе проб НТО из воздуха и измерении содержания трития в этих пробах.

В связи с тем, что НТО по своим физико-химическим свойствам, кроме радиоактивности, мало отличается от H_2O , то для отбора проб применимы практически все методы, используемые для поглощения обычной воды — сорбция твёрдыми и жидкими поглотителями, вымораживание и т. п. Дополнительно для отбора проб НТО можно использовать поглощение её протиевой водой (изотопное разбавление).

Методы отбора проб НТО из воздуха можно разбить на две большие группы: аспирационные — основаны на прокачке воздуха через поглотители; диффузионные — основаны на диффузии молекул воды в область с малой концентрацией (поглотитель) из области с большой концентрацией (окружающее пространство).

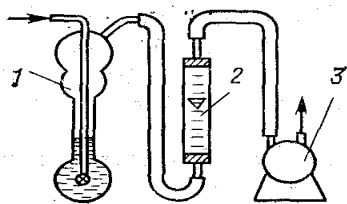


Рис. 1.22. Схема установки для отбора проб НТО из газовых сред:
1 — поглотительный элемент;
2 — ротаметр; 3 — воздуходувка

Структурная схема установки (аспираторной) показана на рис. 1.22. Её основой является поглотительный элемент. Расход прокачиваемого воздуходувкой через поглотитель воздуха контролируется ротаметром, который для исключения погрешностей измерения (сорбции влаги, эффект памяти) располагается за поглотительным элементом. В зависимости от типа поглотителя можно рассматривать следующие методы: вымораживание адсорбция, изотопное разбавление.

Метод вымораживания основан на конденсации паров воды в металлической либо стеклянной охлаждаемой ловушке (рис. 1.23). В качестве охладителя может быть использован жидкий азот ($T_{\text{охл}} = -196\text{ }^{\circ}\text{C}$) или смеси этилового спирта, эфира, ацетона с твёрдой углекислотой ($T_{\text{охл}} = -72 \dots -78\text{ }^{\circ}\text{C}$). При выборе охладителя следует иметь в виду, что жидкий азот вымораживает углекислоту из контролируемого воздуха, что приводит к засорению ловушки и повышению её сопротивления. В охлаждаемой ловушке могут образовываться мелкозернистые частицы льда; их последующее превращение в хлопья (снежинки) обуславливает снижение эффективности отбора и вынос их из ловушки с потоком прокачиваемого воздуха. Чтобы предотвратить эти потери, в ловушку иногда помещают стекловату, шарики — стеклянные либо стальные. В качестве охлаждаемых жидкостей могут также служить различные соли в смеси со льдом или водой, позволяющие получить $T_{\text{охл}}$, равную $-20 \dots -50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Чтобы исключить погрешности, связанные с потерями паров воды, дополнительно используют приборы для определения абсолютной влажности

воздуха. Концентрацию НТО в воздухе по результатам анализа проб воды рассчитывают по формуле

$$C_{\text{НТО}} = (Q_{\text{НТО}} \cdot q_{\text{в}}) / w_{\text{пр}},$$

где $C_{\text{НТО}}$ — концентрация трития в воде; $q_{\text{в}}$ — количество воды, содержащееся в объёме прокачанного воздуха $w_{\text{пр}}$. Количество воды $q_{\text{в}}$ определяют прямым измерением объёма (массы) пробы или расчётным путём по результатам контроля абсолютной влажности воздуха.

Чувствительность метода зависит от влажности контролируемого воздуха и составляет 10^{-13} – 10^{-14} Ки/л при использовании для измерения концентрации трития в воде жидкостных сцинтилляционных счётчиков. Применение пропорциональных счётчиков дает возможность повысить чувствительность на 1–2 порядка.

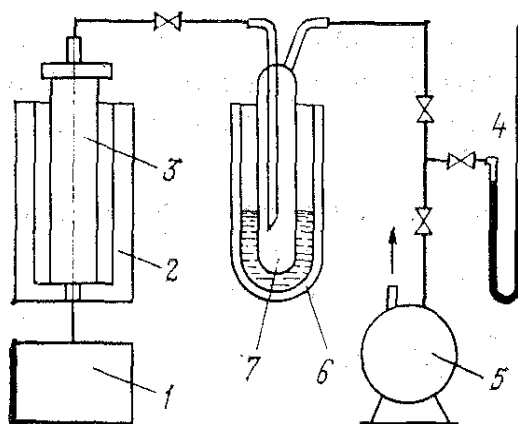


Рис. 1.23. Схема установки для термовакuumной десорбции воды:

- 1 — терморегулятор; 2 — электрическая печь; 3 — ловушка с адсорбентом;
4 — ртутный манометр; 5 — форвакуумный насос; 6 — ловушка с жидким азотом;
7 — вымораживающая ловушка для улавливания НТО

7.3. Методы концентрирования трития

В литературе описаны способы предварительного концентрирования трития в воде, что позволяет повысить чувствительность метода в десятки и сотни раз. К ним можно отнести термодиффузионные каскады и ректификацию [Методы измерения..., 1978; Методические указания..., 2002], газовой хроматографические методы [Методические указания..., 2002] и др.

При использовании в качестве измерительной аппаратуры жидкостных сцинтилляционных счётчиков целесообразнее провести обогащение в жидкой фазе. В этом случае могут быть использованы методы перегонки воды, основанные на различиях парциального давления паров тритиевой и протиевой воды. Один из таких методов основан на ректификации воды в насадочной колонке под вакуумом, с помощью которого достигается обогащение проб тритием в 100–1000 раз за 120–650 часов. К недостаткам метода можно отнести относительную сложность аппаратуры [Методы измерения..., 1978; Методические указания..., 2002].

Пробы трития обогащают как в среде водорода, так и в воде. Для обогащения проб в среде водорода наиболее часто используют метод термодиффузии. В этом случае аппарат представляет собой вертикальную цилиндрическую колонку с проволокой, натянутой вдоль оси. Колонка наполняется газообразными изотопами водорода. Проволока нагревается, а стенка колонки охлаждается. У холодной стенки колонки происходит обогащение смеси тритием. Соединение двух колонок и контейнера с водой объёмом 12 л обеспечивает десятикратное обогащение пробы при более чем 95 %-м извлечении трития в течение 12 часов [Методические указания..., 2002]. Недостатки этого метода: громоздкость аппаратуры, необходимость выделения водорода из проб воды, трудность определения коэффициента обогащения в пробе.

Из-за сложности применения оборудования вышеперечисленные методы не нашли широкого применения. Наиболее приемлемым является электролизный способ обогащения, заключающийся в разложении растворов электролитов электрическим током в специальных электролитических ячейках (электролизёрах). Основа используемых вариантов метода электроосаждения едина: процесс ведётся в электролитической ячейке, выделение трития достигается на катоде. Метод основан на значительной разности в скорости выделения лёгкого и тяжёлых изотопов водорода при разрядке ионов на катоде в процессе электролитического разложения воды. Отношение трития к протию в выделяющемся при электролизе газообразном водороде в 20–35 раз меньше этого отношения в разлагающейся воде. В итоге при плотности тока около $0,1 \text{ A/cm}^2$ и температуре $100 \text{ }^\circ\text{C}$ в остающихся 5 % воды содержится 85–95 % первоначального содержания трития в пробе.

Однако имеется немалое число разновидностей метода. Различия касаются практически всех составных частей процесса: конструкции электролитической ячейки, вида электродов, их расположения, состава электролита, плотности тока, длительности электролиза и ряда других характеристик.

Для количественного определения трития в пробах природной воды используется предварительное обогащение методом одноступенчатого электролиза с одним или двумя доливами [Чиркова, 1947]. Метод основан на значительной разнице в скорости выделения легкого (протия) и тяжелых (дейтерия и трития) изотопов водорода при разрядке ионов на катоде в ходе электролитического разложения воды. Выделяющийся при этом молекулярный водород обогащается протием, а электролит — соответственно тритием и дейтерием (последнего в пробах мало, поэтому при количественном определении трития им можно пренебречь).

Обогащение производится с помощью специально сконструированной электролитической установки, представляющей собой плексигласовую ванну, которая наполняется дистиллированной водой (рис. 1.24). На верхней панели крепят два ряда электролизёров. В верхней части ванны имеется система металлических трубок, через которые осуществляется подача и сброс проточной воды, обеспечивающей охлаждение системы. Температура воды в ванне поддерживается на уровне не более $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Основным элементом ячейки является стеклянный электролизёр объёмом 250 мл, окружённый стеклянной рубашкой для охлаждающей жидкости с пробкой, в которой закреплены две пары электродов, изготовленных из стали (катод) и никеля (анод). Для коррозионной стойкости электроды предварительно

фосфатировали. Рабочая поверхность каждого электрода (односторонняя) равна 40 см². На пробке электролизера с помощью шлифового соединения крепится стеклянный резервуар с краном, который одновременно служит пароуловителем и дополнительной ёмкостью для пробы воды (500 мл). Для исключения попадания паров тритиевой воды из окружающего воздуха в электролизёр выброс газообразных продуктов электролиза воды осуществляется через гидрозатвор, представляющий собой ловушку с вазелиновым маслом. В установке предусмотрена возможность дистилляции (отгонки) воды из щелочного остатка после окончания электролиза, для чего к электролизёру подсоединен приёмник дистиллята.

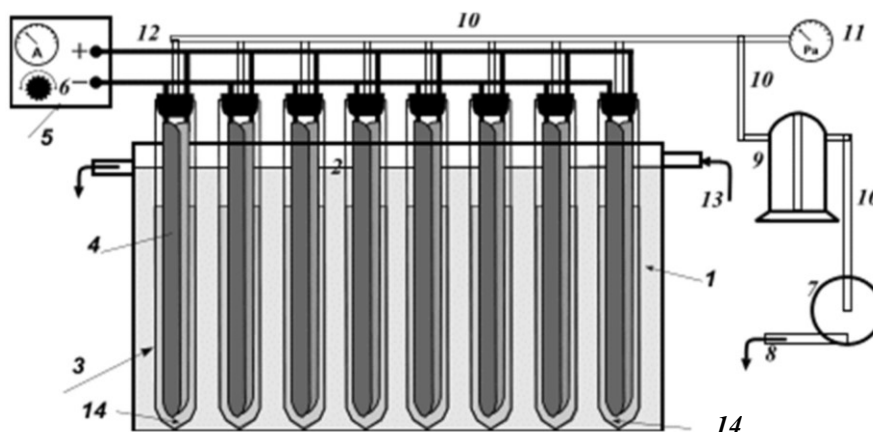


Рис. 1.24. Общий вид установки для электролитического обогащения водных проб тритием: 1 — плексигласовая ванна; 2 — змеевик (холодильник); 3 — электролизёры; 4 — электроды; 5 — блок питания; 6 — регулятор тока; 7 — вытяжной компрессор; 8 — вывод; 9 — конденсор; 10 — газыводящие трубки; 11 — манометр; 12 — соединительные провода; 13 — кран для подачи холодной воды; 14 — исследуемый раствор

В зависимости от поставленных задач установка позволяет производить обогащение проб с начальным объёмом 250 мл или, с учётом дополнительного резервуара (пароуловитель), 750 мл. В последнем случае по мере разложения воды в электролизёре её добавляют из дополнительного резервуара. Электролиз проводят при токе 20 А до объёма воды в электролизёре 120–140 мл, затем ток уменьшают до 10 А и при остатке электролита примерно 15 мл ток снижают до 5 А. Электролиз прекращают при объёме пробы 5 мл. Время, необходимое для разложения воды, при начальном объёме пробы 250 мл равно 55–66 часов, при объёме 750 мл — 120–130 часов.

Концентрация гидроксида натрия в начале процесса составляет 0,5 %, в конце — 25 %. Охлаждают электролизёры проточной водой с температурой 7–10 °С, подаваемой со скоростью 2–3 л/мин (0,4–0,6 л/мин на каждую электролитическую ячейку). Воду щелочного остатка отгоняют под вакуумом, при этом электролизёр нагревают до 50–70 °С горячей водой, подаваемой в его рубашку, а приёмник конденсата охлаждают водой до 10 °С. Коэффициент обогащения проб (по концентрации трития) при указанных выше режимах электролиза и начальном объёме пробы 250 мл равен 35, при объёме 750 мл —

100. Установка позволяет обогащать четыре пробы. Пятую электролитическую ячейку используют для контроля стабильности коэффициента обогащения, для чего в ней производят разложение воды с начальной концентрацией $(3,7-7,4) \cdot 10^2$ Бк/л.

Существует метод одноступенчатого электролиза с одним или двумя доливками. Обогащение производят с помощью электролитической установки, представляющей собой плексигласовую ванну, которая наполняется дистиллированной водой. На верхней панели крепятся два ряда электролизёров. В верхней части ванны имеется система металлических трубок, через которую осуществляют подачу и сброс проточной воды, обеспечивающую охлаждение системы. Температура воды в ванне поддерживается на уровне не более 300°C .

Электролизёры представляют собой стеклянные трубки из термо- и химически стойкого стекла. В электролизёры вставляют электроды, имеющие вид пяти параллельных пластин, которые изготовлены из мягких сортов стали, между ними имеется свободное пространство. Пластины соединены между собой через одну, образуя катод и анод. Электроды сверху зафиксированы пробками, в которые вставлены стеклянные трубки, выводящие образующийся газ (водород). В электролизёры заливают 150 мл исследуемой воды, в каждый вносят по 3 г химически чистого гидроксида калия, служащего электролитом. После полного растворения реактива включают установку и проводят электролиз при силе тока 10 А. Продолжительность процедуры составляет от 8 до 12 суток. По окончании электролиза замеряют объём воды, помещают в колбы из термостойкого стекла и добавляют в каждую по 9 г нитрата свинца для нейтрализации электролита и для извлечения водорода из гидроксида калия во избежание изотопного эффекта. Воду отгоняют дистилляцией до сухого состояния осадка. Схема ещё одной электролизной установки представлена на рис. 1.25.

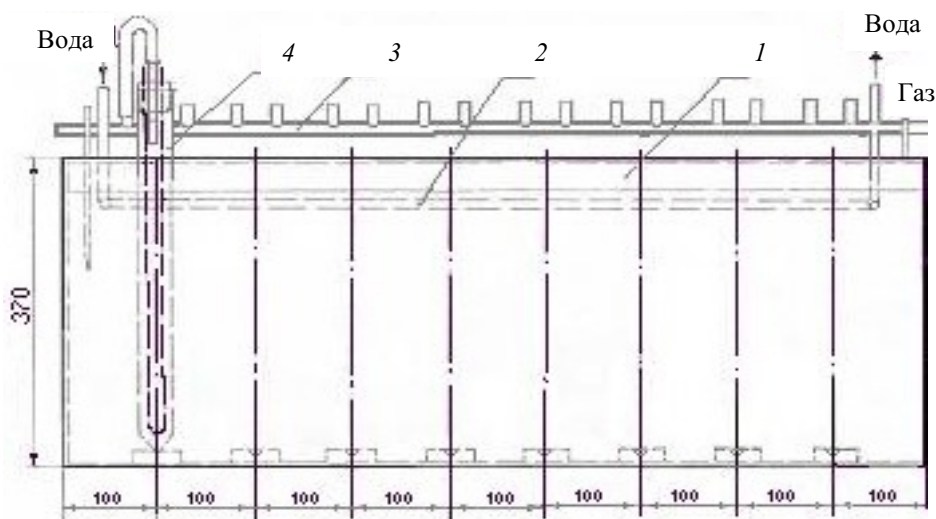


Рис. 1.25. Схема электролизной установки:

- 1 — плексигласовая ванна; 2 — водяной холодильник;
3 — газоотводная трубка; 4 — электролитическая ячейка

Проведённые исследования в течение длительного времени показали, что степень обогащения в одноступенчатом режиме — около 10. Относительная погрешность коэффициента обогащения для каждой электролитической ячейки составляет 33 %. При этом электролизёр разовой загрузки даёт наибольшее обогащение, так как все молекулы воды НТО участвуют в процессе во время всего цикла электролиза в отличие от электролизёров с постоянным или периодическим добавлением пробы. Охлаждение электролизёров до температуры от +8 до +10 °С осуществляют проточной холодной водой в специальной ванне, куда погружают 10 электролизёров. В качестве электролита используют 1 %-й по массе раствор перекиси натрия. Электролиз проводят при напряжении 2,3 В и силе тока 7–8 А. Начальный объём пробы — 250 мл, конечный — 10 мл, время, затрачиваемое на обогащение пробы, — 120 часов.

В заключение литературного обзора следует подчеркнуть, что тритий в ряду радиоактивных загрязнителей природной среды занимает особое место: выбросы и сбросы с трудом поддаются очистке от трития. Из литературных источников следует, что наибольшие концентрации трития в объектах внешней среды наблюдаются вблизи промышленных реакторов, радиохимических заводов и АЭС. Распространение трития в слое атмосферного воздуха и воде приводит к локальному, региональному и глобальному загрязнению.

Для определения содержания трития использовались в том числе пробы воды, подвергнутые различным вариантам очистки: только фильтрованию, совокупности фильтрования и дистилляции.

Отобранные образцы поверхностных водоёмов отфильтровывались через мембранные фильтры с диаметром пор 0,2 мкм. Из общего объёма воды отбиралась аликвота объёмом 50 мл, которая подвергалась двукратной очистке с KMnO_4 (25 мг) методом дистилляции в специально разработанном устройстве. В этом случае образцы очищаются от других радионуклидов и присутствующих в пробе органических и неорганических веществ, которые способствуют «гашению» свечения сцинтилляции. Для обеспечения полноты перехода трития в приёмную колбу перегонку вели досуха [Packard Instrument..., 1995].

При проведении предварительных измерений тритийсодержащих проб воды с использованием дистилляции было обнаружено следующее:

1) загрязнение очищенного образца растворимыми солями радионуклида ^{40}K , вносимого в систему вместе с KMnO_4 , что было подтверждено данными γ -спектрометрических измерений и интеркалибровкой образцов в МосНПО «РАДОН» (г. Москва);

2) существенные потери радиоизотопа из-за неполной герметизации дистилляционной установки.

Ранее в работе японских исследователей были приведены четыре основные преимущества использования мембранных фильтров для подготовки проб воды к определению содержания трития вместо дистилляции [Radioactive Measurement..., 1997]:

1) для использования метода дистилляции затрачивается достаточное количество времени, поскольку каждая проба подвергается очистке несколько раз;

2) вещества, имеющие более высокую температуру кипения, чем вода, вряд ли могут быть удалены при дистилляции;

3) пробы воды, отобранные в окружающей среде, не могут являться тушащими агентами;

4) сцинтилляционные коктейли, появившиеся в последнее время на рынке, сами по себе не являются тушащим агентом.

Таблица 1.15
 Результаты проверки
 правильности метода дистилляции
 тритийсодержащих проб воды
 ($n = 5$, $P = 0,95$) [Бондарева,
 Помозова, 2009]

Содержание НТО, Бк/л		Sr
Введено	Найдено	
5	< 3	
15	8 ± 2	1
50	30 ± 3	1
200	150 ± 10	2

На основании ранее описанного была проведена методическая работа с использованием метода «введено-найденно», в ходе которой в дистилляционную систему вместе с пробой воды вносилась метка, содержащая тритий в виде НТО. В итоге было обнаружено, что потери внесённого трития после двукратной дистилляции могут достигать 40 % от общего количества. Результаты приведены в табл. 1.15 (с вычетом содержания трития в исходной воде — 4 Бк/л).

Кроме того, при современном уровне приборного оснащения и программного обеспечения можно идентифицировать

и определить содержание отдельно взятого радионуклида (в том числе и трития), находящегося в смеси с другими радиоизотопами в воде, в особенности для слабоминерализованных источников, каким является река Енисей. Поэтому было принято решение использовать именно фильтрование водных образцов, что и осуществлялось в дальнейшем.

Проведение исследований по влиянию химического тушения на эффективность измерений трития [Бондарева, Помозова, 2009].

Для исследований использовались несколько типов тушащих агентов:

- органические соединения — четыреххлористый углерод CCl_4 (ТХУ), трихлорметан CHCl_3 (ТХМ), циклогексанон $\text{C}_6\text{H}_8\text{=O}$ (ЦГ), толуол $\text{C}_6\text{H}_5\text{-CH}_3$ (ТЛ), которые часто используют в качестве растворителей;
- неорганические соединения — раствор соли гидрокарбоната натрия (NaHCO_3), азотную кислоту (HNO_3), раствор перманганата калия (KMnO_4), которые используются при дистилляции образцов.

В качестве неоднородных примесей использовали хлопья измельчённого бумажного фильтра. Коктейль и агенты смешивались в различных соотношениях.

В случае использования органических соединений в качестве контроля была выбрана смесь Ultima Gold-AB + НТО (с активностью трития 4,5 Бк на пробу, применяемую во всех системах). Для приготовления исследуемых систем в виалу наливалось по 10 мл коктейля, к которому добавлялись определённые количества органических соединений. После перемешивания вносилась тритиевая вода (0,5 мл). При использовании неорганических соединений (NaHCO_3 , HNO_3 , KMnO_4) независимо от вносимого объёма агента соотношение раствор — коктейль Ultima Gold-AB было 8 к 12. До недостающего объёма, то есть до 8 мл, добавляли бидистиллированную воду. При изучении влияния фактора гетерогенности в систему проба (бидистиллированная вода + НТО) — Ultima Gold-AB добавлялись различные навески хлопьев. В последних случаях в качестве контроля была выбрана смесь бидистиллированная вода + НТО — Ultima Gold-AB в соотношении 8 к 12. После смешивания виалы закрывали пробкой и встряхивали в течение 2 минут до полного смешивания пробы со сцинтилляционным коктейлем. Для стабилизации люминесценции перед измерениями смесь выдерживалась в тёмном и прохладном месте в течение 24 часов [Бондарева, Помозова, 2009].

Изучение свойств тушащих агентов проводили с помощью определения значения индекса тушения (tSIE), от величины которого зависит эффективность измерений [Packard Instrument..., 1995]. Все используемые смеси содержали одинаковое количество трития, поэтому эффективность измерения может быть представлена в виде графической зависимости как функции от tSIE. Зависимость эффективности измерения трития от изменения tSIE от разного количества CCl₄, добавляемого к системе Ultima Gold-AB + НТО, представлена в табл. 1.16 и на рис. 1.26.

Таблица 1.16

Зависимость tSIE и эффективности измерений трития от количества внесённого CCl₄ [Бондарева, Помозова, 2009]

Внесённый объем, мкл	0	4	12	20	30	50	80	120	150
tSIE	710	649	606	535	475	379	300	220	166
Эффективность, %	56,7	54,5	52,8	49,7	46,7	41,2	35,6	27,7	20,7

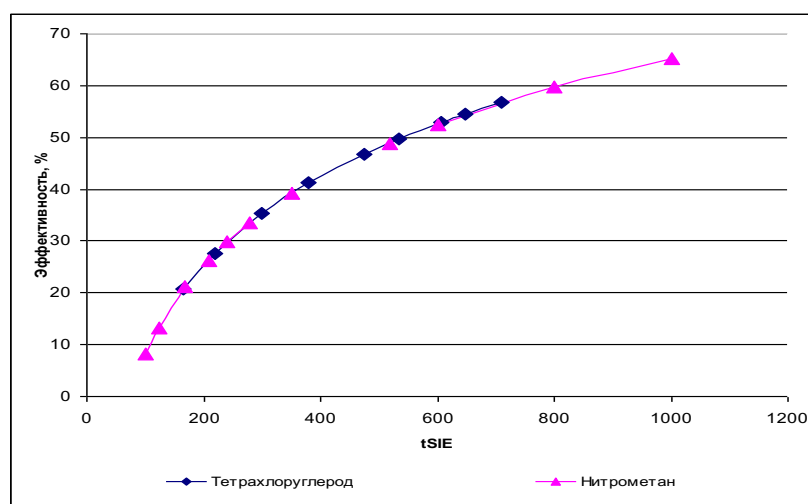


Рис. 1.26. График зависимости эффективности измерения трития от величины индекса тушения [Бондарева, Помозова, 2009]

Из данных научной литературы нам известно, что при использовании в качестве тушащего агента нитрометана максимальная эффективность измерения (~ 48 %) достигается при индексе тушения 518. Минимальная эффективность измерения 0,33 % получена при tSIE, равном 17,9, а tSIE, равный 45 и ниже, может быть результатом в высокой степени счета фонового излучения (эффективность измерения — 3 %) [Packard Instrument..., 1995].

Из представленной зависимости видно, что результаты эксперимента с использованием тетрачлоруглерода совпадают с литературными данными, полученными для нитрометана. Это позволяет сделать вывод о том, что полученная кривая для CCl₄ может быть применена для изучения влияния всех видов тушения для данного прибора и для выбранных условий определения содержания трития.

При использовании растворов других органических соединений также выявлены обратно пропорциональные зависимости эффективности измерения от количества внесённого тушащего агента, что также подтверждает полученную ранее зависимость для эффективности измерения трития (табл. 1.17).

На основании проведённых экспериментов были построены кривые эффективности измерения трития для изучаемых органических соединений (рис. 1.27). Как видно из представленных результатов, эффективность измерения трития практически не зависит от вносимых объёмов толуола.

Таблица 1.17

Зависимость эффективности измерений трития
от вида химического агента [Бондарева, Помозова, 2009]

Органическое соединение	Внесённый объём, мл	tSIE	Эффективность, %
Трихлорметан	0	729	57
	5	108	10
	7,5	64,4	5
	10	39,9	< 5
Циклогексанон	0	729	57
	5	203	26
	7,5	155	19
	10	122	13
Толуол	0	729	57
	5	724	57
	10	721	57

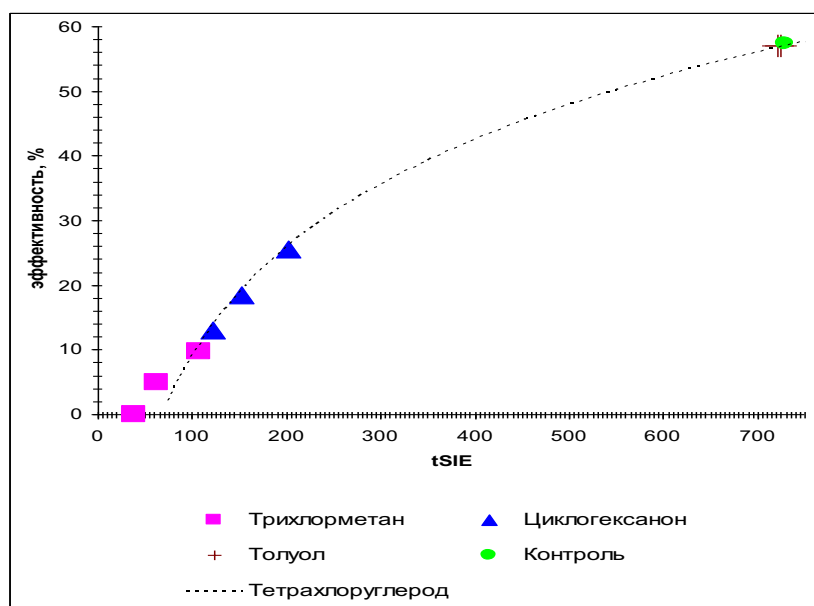


Рис. 1.27. Зависимость эффективности измерений от индекса тушения tSIE для различных типов органических тушащих агентов [Бондарева, Помозова, 2009]

При изучении влияния других органических соединений было обнаружено следующее: в случае использования одинаковых объемов ЦГ и ТХМ получены значения tSIE, отличающиеся более чем в 2 раза. На наш взгляд, это может быть связано с тем, что строение молекул исследуемых органических соединений существенно отличается.

Проведены исследования по выявлению изменения tSIE при использовании неорганических соединений и фактора гетерогенности (табл. 1.18). Кривая эффективности измерений для неорганических тушащих агентов представлена на рис. 1.28.

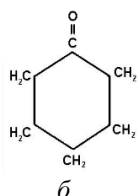
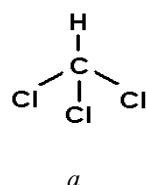
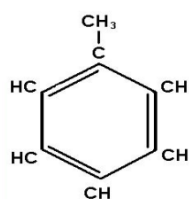
Таблица 1.18

Зависимость эффективности измерений от вида химического агента*
[Бондарева, Помозова, 2009]

Химический агент	Внесённый объём, мл	tSIE	Эффективность, %
HNO ₃	0	306	35,8
	0,5	303	35,6
	1	296	35
	1,5	293	34,8
	7,5	291	34,2
KMnO ₄	0	306	35,8
	2	307	35,9
	5	261	31,9
	7,5	247	30,5
	–	–	–
Хлопья	0**	306	35,8
	5**	302	35,5
	100**	296	35
	500**	242	30
	600**	100	11,3

* Неорганические соединения и гетерогенность.

** Внесённая масса, мг.



Мы знаем, что структура молекулы толуола содержит бензольное кольцо с чередующимися простыми и двойными связями между атомами углерода (–C=C–). А так как Ultima Gold-AB приготовлен на основе толуола в качестве растворителя [Perkin Elmer..., 2000a], то внесение любого количества этого растворителя в систему на эффективность измерения трития не влияет.

В молекулах других используемых соединений: ТХМ (а) и ЦГ (б) такого типа связей нет.

При смешивании с раствором NaHCO₃ через 24 часа произошло расслоение смеси с коктейлем на две несмешивающиеся жидкости.

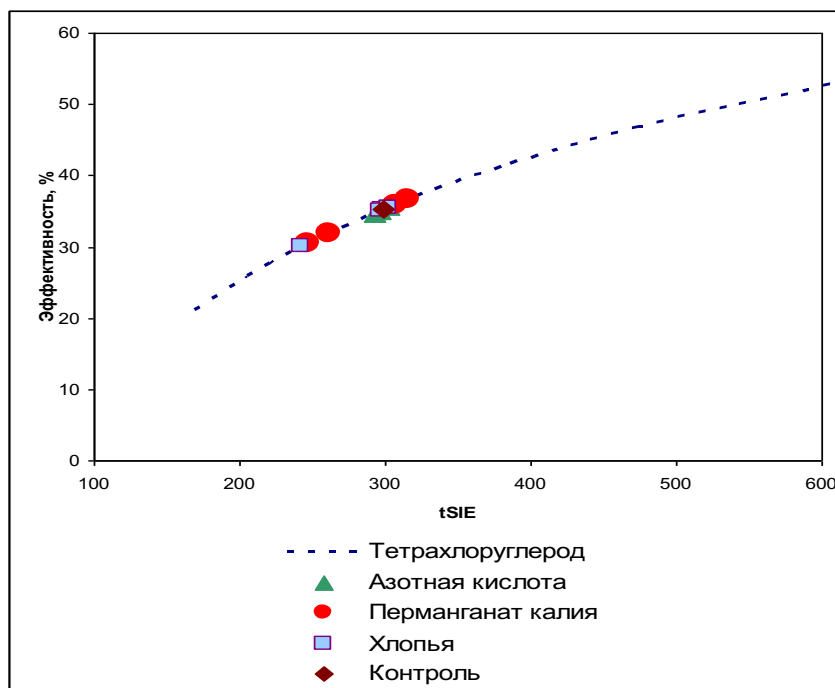


Рис. 1.28. Зависимость эффективности измерений от индекса тушения tSIE для различных типов неорганических тушащих агентов [Бондарева, Помозова, 2009]

Из проведённых ранее исследований, известно, что использование сцинтилляционного коктейля Ultima Gold-AB возможно только в нейтральных или кислых средах. В связи с тем, что раствор гидрокарбоната натрия имеет слабощелочную среду, это препятствует гомогенизации смеси коктейля и пробы [Perkin Elmer..., 2000a, b]. Вследствие этого не удалось получить достоверной зависимости значений эффективности измерения от количества внесенного тушащего агента.

При добавлении азотной кислоты индекс тушения, с учётом погрешности, практически не изменялся, что согласуется с данными исследований, поскольку такой тушитель, как азотная кислота, способен влиять на эффективность измерения только в том случае, если он присутствует в пробе в очень больших концентрациях (свыше 5 моль/л) [Бондарева, Помозова, 2009].

В случае неоднородности системы, то есть при добавлении целлюлозных хлопьев, эффект снижения эффективности измерения наиболее выражен при значительном количестве добавляемых хлопьев (более 500 мг в 20 мл). Это происходит из-за того, что при их добавлении в пробе возникают локальные неоднородности. При увеличении количества хлопьев происходит образование агрегатов за счёт слипания, а это, в свою очередь, приводит к гетерогенности исследуемых образцов с последующим расслоением пробы. В таких случаях зона действия излучения представляет собой полусферу, площадь поверхности которой равна 2π , тогда как для гомогенного раствора она имеет значение 4π [Packard Instrument..., 1995; Perkin Elmer..., 2000b].

При рассмотрении эффекта оптического тушения, в нашем случае — влияния добавок раствора перманганата калия — получено следующее: с увеличением содержания оптически тушащего вещества происходит рост интенсивности окраски мешающего реагента, что и является причиной тушения импульсов при их прохождении непосредственно через среду за счёт торможения излучения хромофорными ионами. Поэтому при добавлении тушащего агента эффективность измерений снижается. Но данный эффект нельзя считать только результатом оптического тушения, поскольку перманганат калия, являясь химическим реагентом, способен также вызывать химическое тушение. Вклад каждого из видов тушения в данном случае может быть равным.

При анализе данных, полученных для контрольных растворов, используемых в исследовании влияния различных типов тушащих агентов на эффективность измерения трития, было обнаружено следующее: при увеличении содержания воды в системе *проба — коктейль* с 0,5 до 8 мл эффективность измерения трития уменьшается с 57 до 35,8 %. Это вызвано тем, что вода по своим физико-химическим свойствам и параметрам может в значительной степени поглощать излучение трития и тем самым является тушащим агентом.

Выявленные подходы в измерении содержания трития в модельных растворах впоследствии использовались для определения содержания трития в реальных образцах.

При определении трития в атмосферных осадках (снеге) пробы отбирались в конце марта, когда заканчивается основной зимний сезон. Для отбора на поверхности снега вымерялся квадрат размером 20×20 см. Проба снега изымалась на всю глубину, до поверхности грунта. Измерялась толщина снегового покрова. После отбора проба снега оттаивала при комнатной температуре до воды, затем фильтровалась через бумажный фильтр, далее через мембранный ацетат-целлюлозный фильтр с диаметром пор 0,45 мкм. Измерялся общий полученный объём. Затем из усредненной пробы отбиралась аликвота (10 мл), смешивалась с коктейлем и поступала на измерение содержания трития после установления равновесия в смеси (24 часа).

В последующих разделах будут описаны некоторые особенности специфики в отборе образцов, пробоподготовке и проч. для каждого отдельного случая.

РАЗДЕЛ 2. ПРЕДПРИЯТИЯ УРАЛЬСКОГО РЕГИОНА

Глава 1. Производственное объединение «Маяк»

1.1. Характеристика района исследований

Производственное объединение «Маяк» (ПО «Маяк») расположено на восточном склоне Уральских гор в Челябинской области и относится к территории Озерского городского округа. Постановление СНК СССР № 3007-892, принятое 1 декабря 1945 г., было направлено на создание новой отрасли промышленности, предназначенной для получения оружейного плутония и переработки делящихся материалов с целью создания паритета в области производства ядерного оружия. Промышленная площадка будущего предприятия размещалась за каскадом Каслинско-Кыштымских озер на восточном берегу оз. Кызылташ, в районе истока реки Теча. Его строительство началось в 1946 г., пуск первого прямого уранграфитового ядерного реактора состоялся в июле 1947 г. В декабре 1948 г. введён в эксплуатацию радиохимический завод по выделению оружейного плутония, в 1962 г. — завод по производству радиоактивных материалов, в 1977 г. — комплекс РТ-1 по регенерации облучённого ядерного топлива. В 1991 г. запущен цех остекловывания жидких высокоактивных отходов. По состоянию на 2011 г., производственное объединение «Маяк» включало в себя 7 основных заводов и 16 вспомогательных подразделений с числом работающих более 12 тыс. человек. Предприятие занимает площадь 256 км², в его составе реакторное, радиохимическое, химико-металлургическое, радиоизотопное и приборостроительное производства, а также ряд структурных подразделений (управление, центральная заводская лаборатория и проч.).

В начальный период его работы информация о воздействии радиоактивных веществ на объекты окружающей среды была весьма ограничена, поэтому при проектировании атомных объектов во многих странах допускалось сбрасывать техногенные радиоактивные отходы непосредственно в открытую гидрографическую сеть (реки, озера, моря). Примером такого подхода в обращении со средне- и низкоактивными жидкими отходами на ПО «Маяк» в 1949–1952 гг. является использование реки Теча для сброса разбавленных радиоактивных вод предприятия. В результате этого крупномасштабному радиоактивному загрязнению подверглись все компоненты реки (вода, донные отложения, пойма, биота), а жители прибрежных населённых пунктов подверглись значительному радиационному воздействию [Мокров, 2002а, б]. Всего в гидрографическую сеть реки поступило приблизительно $8,8 \cdot 10^{16}$ Бк (2,78 МКи) радионуклидов [Садовников и др., 2002; Закономерности..., 2004].

После периода интенсивных сбросов в реку Теча с 1949 по 1956 гг., чтобы снизить поступление радионуклидов в открытую гидрографическую сеть, была проведена реконструкция русла реки и создание на ней серии водоёмов-хранилищ (В-3, В-4, В-10, В-11), отделённых плотинами. В обход каскада водохранилищ были сооружены левобережный обводной канал (ЛБК), сбрасывающий «чистую» воду из оз. Иртяш, и правобережный обводной канал (ПБК), принимающий стоки

реки Мишеляк. Оба канала заканчиваются ниже плотины водоёма В-11 и впадают в реку Теча ниже каскада водохранилищ (рис. 2.1).

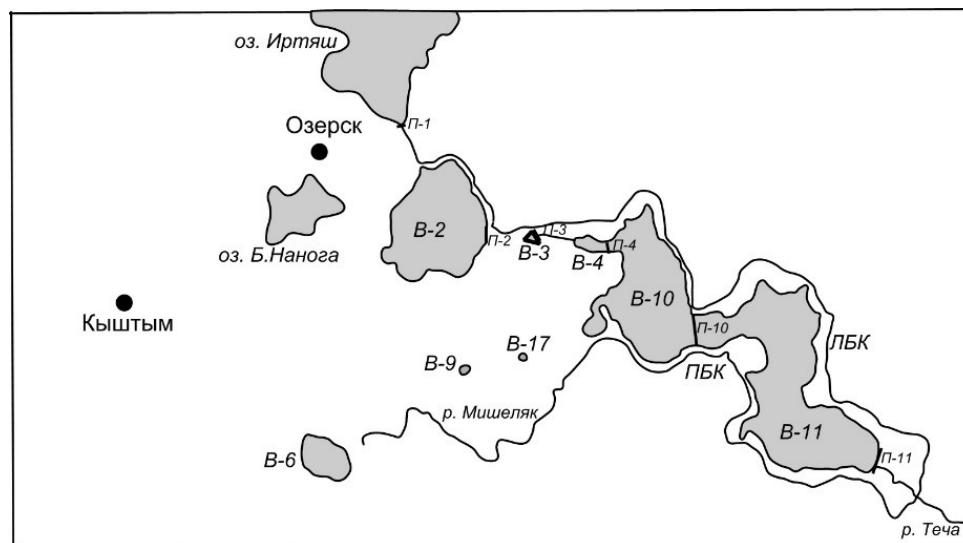


Рис. 2.1. Карта-схема расположения производственных водоёмов в зоне воздействия ПО «Маяк» [Садовников и др., 2002]

К числу наиболее «грязных» водоёмов, которые эксплуатировались ПО «Маяк», относятся озёра Кызылташ (В-2), Карачай (В-9) и Старое Болото (В-17). Первое из них с 1948 г. и по настоящее время используется в качестве водоёма-охладителя ядерных реакторов и для сброса слаборадиоактивных, химических и хозяйственно-бытовых веществ. На начальном этапе эксплуатации озеро было проточным; с северо-запада в него впадала река Теча, вытекающая из оз. Иртяш, и на востоке выходила из него. В дальнейшем сток воды из озера был зарегулирован. В южной и юго-восточной его части находятся пять водозаборов, обеспечивающих промышленное водоснабжение производств и охлаждение промышленных установок. В водоём сбрасываются охлаждающие воды, воды из бассейнов и шахт выдержки реакторов, транспортных галерей, душевых и прачечных, хозяйственно-фекальные воды.

Содержание радионуклидов в экосистеме оз. Кызылташ составляет примерно 4030 ТБк. В середине 1950-х гг. водоём подвергался сильному тепловому воздействию. В начале сбросного канала температура воды достигала 90 °С, после прохождения через сбросной канал длиной около 2,5 км она охлаждалась до 50–70 °С. В зимний период значительная часть водоёма не замерзала. Такой тепловой режим приводил к поверхностному испарению воды с поверхности озера. После 1990 г. с выводом из эксплуатации нескольких промышленных реакторов поступление избыточного тепла в водоём сократилось [Смагин, 2007, 2013].

Озеро Карачай (В-9) с октября 1951 г. использовалось для удаления радиоактивных отходов. За время эксплуатации в нём скопилось примерно 120 МКи (4 ЭБк) радиоактивных материалов (в основном ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr). В апреле-мае 1967 г. в результате ветрового рассеяния высохших донных отложений с обнажившихся берегов оз. Карачай было выброшено в атмосферу 0,6 МКи

радионуклидов, территория, загрязнённая в результате этого, получила название Карачаевского следа. Начиная с 1967 г. ПО «Маяк» проводились работы по засыпке мелководий и поднятию берега по периметру водоёма, а также по рекультивации территории вокруг водоёма. К ноябрю 2015 г. водоём был полностью закрыт скальным грунтом и бетонными блоками. К настоящему времени водное зеркало оз. Карачай практически отсутствует, но на глубине сохраняется линза загрязнённых вод, которая движется в направлении рек Мишеляк и Теча.

«Старое болото» (В-17) представляет собой искусственный водоём, расположенный в естественной впадине рельефа. Сброс радиоактивных отходов в него был начат в 1949 г., в 1952 и 1954 гг. были построены дамбы, исключая попадание воды из водоёма в открытую гидрографическую сеть. Максимальное количество высокоактивных продуктов из емкостей-хранилищ было сброшено в В-17 при ликвидации последствий аварии, произошедшей на ПО «Маяк» в 1957 г., что существенным образом повлияло на радионуклидный состав экосистемы водоёма. В настоящее время там депонировано более 1 МКи (37 ПБк) среднеактивных отходов, при этом суммарная активность β -излучателей определяется $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ и ^{137}Cs , 99 % активности всех радионуклидов, исключая тритий, депонировано в грунте [Стукалов, 2004].

С 1951 г., по мере накопления научных знаний о поведении радионуклидов в природной среде и их воздействии на организм человека, на ПО «Маяк» стали проводиться мероприятия, направленные на снижение радиационной опасности территории: прекращен прямой сброс жидких радиоактивных отходов в реку Теча, часть поймы реки изъята из хозяйственного пользования, засыпано оз. Карачай, жидкие радиоактивные отходы переводятся в твёрдые формы. С 2008 г. к реализации принята федеральная целевая программа «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности». С 2014 г. введён принцип постоянного совершенствования деятельности предприятия, направленной на повышение уровня экологической безопасности и снижения воздействия на окружающую среду, и принцип информационной открытости — прозрачность и доступность экологической информации. Осуществляется взаимодействие предприятия с международными и государственными организациями и институтами в целях проведения мониторинговых работ по изучению радиационной ситуации в зоне воздействия предприятия и обеспечения экологической безопасности в регионе.

1.2. Водоёмы производственного назначения

При постоянном сбросе повышенных концентраций трития в открытые водоёмы в результате процессов миграции возможно загрязнение прилегающих территорий на значительном расстоянии от места сброса и проникновение радионуклида в питьевые воды. В связи с этим опасность представляет серия производственных водоёмов ПО «Маяк», которая включает в себя водные объекты в долине старого русла реки Течи (В-2, В-3, В-4, В-10, В-11) и водоёмы, расположенные южнее Теченского каскада (Татыш, Карачай и Старое болото) (см. рис. 2.1). Указанные водные объекты располагаются на территории санитарно-защитной зоны предприятия.

Исследование содержания трития в водоёмах Теченского каскада проводились в период 2007–2009 гг. [Чеботина и др., 2010]. Пробы воды

из исследуемых водоёмов отбирали вблизи одноименных плотин. Предварительную подготовку этих проб для радиометрии осуществляли в лаборатории ЦЗЛ ФГУП ПО «Маяк», где их подвергали двойной дистилляции с перманганатом калия. Количественное определение трития производили в Отделе континентальной радиоэкологии Института экологии растений и животных УрО РАН (г. Заречный).

На рис. 2.2 показана динамика концентраций трития в исследуемых водоёмах в течение трёх лет наблюдений. В указанный период содержание радионуклида в каждом водоёме варьировало в среднем в 2–3 раза. В водоёме В-2 показатели концентраций изменялись от 3200 до 10 000 Бк/л, В-3 — от 2400 до 8100 Бк/л, В-4 — от 2400 до 6300 Бк/л, В-10 — от 1900 до 3800 Бк/л, В-11 — от 700 до 1800 Бк/л. В указанных водохранилищах средние значения содержания трития в этот период составляли: В-2 — 6730 ± 830 Бк/л; В-3 — 4970 ± 1000 Бк/л; В-4 — 4000 ± 690 Бк/л; В-10 — 2910 ± 300 Бк/л; В-11 — 850 ± 270 Бк/л. В воде реки Теча после впадения в неё ЛБК и ПБК содержание трития в момент исследования составляло в среднем 163 ± 41 Бк/л.

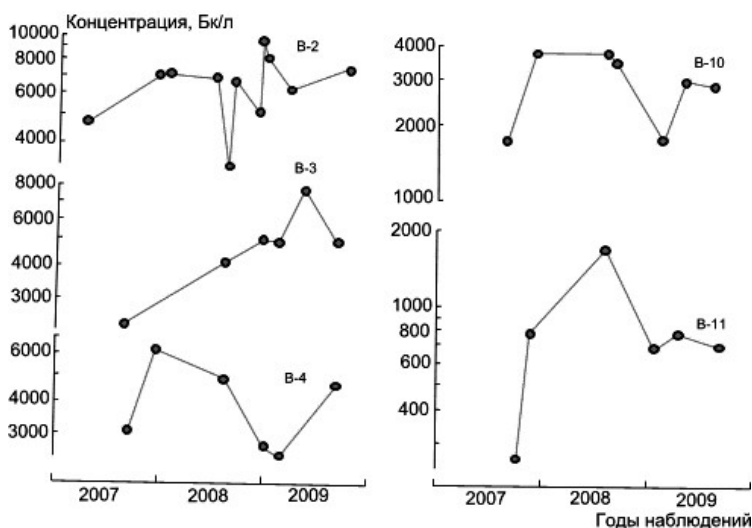


Рис. 2.2. Динамика концентраций трития в производственных водоёмах ПО «Маяк»

Результаты исследования показали, что средняя концентрация радионуклида снижалась в направлении от объекта В-2 к В-11, это снижение в среднем составило 8 раз. Усреднённые за наблюдаемый период концентрации радионуклида в воде указанных водоёмов в зависимости от расстояния места отбора проб до истока реки Теча (исток считали место ее вытекания из озера Иртяш) представлены на рис. 2.3.

Экспоненциальная зависимость между исследуемыми параметрами, полученная для трёхлетнего периода наблюдений, свидетельствует о том, что все водоёмы, расположенные в русле Течи, в том числе и В-2, объединены в единую гидрогеологическую сеть, по которой происходит миграция трития от верховья в сторону плотины П-11. В процессе прохождения воды через каскад водоёмов происходит разбавление тритиевого загрязнения за счёт объёма водной массы серии водохранилищ, чему способствуют значительный фильтрационный

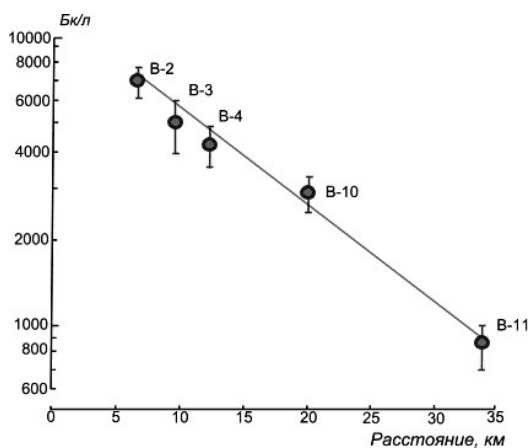


Рис. 2.3. Усредненные концентрации трития в воде производственных водоемов в русле реки Теча в зависимости от их расстояния до истока реки

радионуклида в период исследований составил 1,2 ПБк. Наиболее высоким запасом трития характеризуются самые многоводные водоёмы: В-2 (568 ТБк), В-10 (214 ТБк) и В-11 (391 ТБк), а наиболее низкий запас зарегистрирован в водоёмах В-3 и В-4.

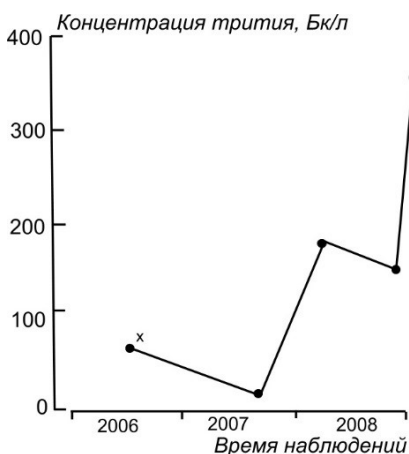


Рис. 2.4. Концентрации трития в воде водоёма В-6, Бк/л.
x — данные по [Атлас..., 2007]

Несмотря на то, что на предприятии производится систематический контроль за содержанием трития в водоёмах производственного назначения, в открытой печати по этому вопросу имеются лишь единичные данные. Сравнение полученных нами результатов с доступной информацией из немногочисленных литературных источников позволило заметить тенденцию снижения содержания радионуклида в воде производственных водоёмов за относительно небольшой период наблюдений — от 2005 до 2009 гг. (рис. 2.5).

поток воды через тело плотин, наличие зон разлома земной коры по ходу русла реки Теча и проч. [Уткин, 1997; Атлас..., 2007]. Следует подчеркнуть, что закономерность, установленная на основании полученных данных, характерна для периода наблюдений 2007–2009 гг., в другие годы может изменяться в зависимости от техногенной деятельности предприятия.

На основании данных, приведённых в работе [Усачев, 2001], рассчитан примерный запас трития в водоёмах, расположенных в русле реки Теча (табл. 2.1). В пяти водохранилищах общий запас

Уровни содержания трития в водоёме В-6 (Татыш), используемого для оборотного технического водоснабжения предприятия, в период исследований были заметно ниже по сравнению с водоёмами Теченского каскада (рис. 2.4). Согласно нашим данным, в период исследований концентрация радионуклида в оз. Татыш изменялась от 18 до 360 Бк/л при среднем значении 153 Бк/л.

Таким образом, концентрации трития в воде водоёмов производственного назначения ПО «Маяк» превышают уровни глобального (1 Бк/л) и техногенного (5 Бк/л) фона на порядки величин, однако в среднем не достигают принятого в нашей стране уровня вмешательства для неорганических соединений радионуклида (7600 Бк/л).

Таблица 2.1

Параметры производственных водоёмов в русле реки Теча
и запас трития в воде в 2007–2009 гг.

Водоём	Площадь зеркала, км ²	Объём воды, млн м ³	Средняя концентрация трития в воде, Бк/л	Запас трития в водоёме, ТБк
В-2	18,6	84,4	6730	568
В-3	0,8	0,78	4970	39
В-4	1,3	4	4000	16
В-10	18	73,5	2910	214
В-11	44	230	850	391
Всего		393		1228

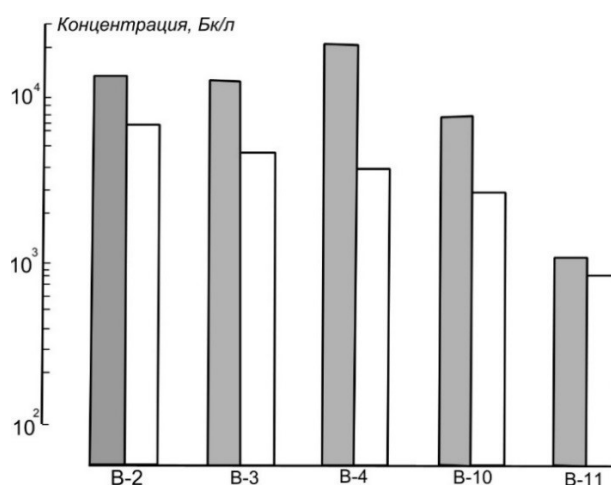


Рис. 2.5. Сравнение усреднённых концентраций трития в водоёмах Теченского каскада в разное время наблюдений: столбики серого цвета — 2005 г. [Атлас..., 2007], В-11 — из работы [Стукалов и др., 2011]; столбики белого цвета — 2007–2009 гг. [Чеботина, 2011]

Учитывая тот факт, что производственные водоемы находятся в пределах санитарно-защитной зоны предприятия, их влияние на окружающую среду может проявиться при фильтрации загрязнённой тритием воды в грунтовые воды и при испарении в атмосферу. В последнем случае можно предполагать, что высокие концентрации трития в воде производственных водоемов могут быть причиной облучения рабочих предприятия и населения близлежащих населённых пунктов. В связи с этим в работе [Екидин и др., 2012] рассчитаны уровни возможного радиационного воздействия на человека от ингаляционного поступления трития с поверхности водоёмов. Показано, что при наихудшем сценарии облучения — проведении ежедневных работ на поверхности либо в непосредственной близости от водоёмов — эффективная доза облучения за счёт ингаляционного поступления трития в организм человека с апреля по ноябрь не превышала 0,92 мЗв. Этот результат получен для В-17, отличающегося от прочих производственных водоёмов наиболее высокими концентрациями трития в воде [Стукалов, 2007]. Рассчитанный показатель

практически не превышает предела дозы для населения (1 мЗв/год), согласно принятым в нашей стране нормативам [Нормы радиационной..., 2009]. Дополнительное облучение на расстоянии 100 м от уреза воды даже при длительном воздействии будет пренебрежимо мало.

1.3. Водоёмы комплексного назначения

Водоёмы комплексного назначения в районе ПО «Маяк» не подвергаются непосредственному воздействию сбросных слаборадиоактивных вод предприятия, поэтому используются для различных народнохозяйственных целей — ловли рыбы, полива сельскохозяйственных угодий, в качестве зон отдыха населения, а в ряде случаев — как источники питьевого водоснабжения населения.

Изучение уровней концентраций трития в указанных водоёмах проводили в 2001–2003 гг. [Тритий в водоёмах..., 2011]. В качестве объектов исследования служили 39 водоёмов, расположенных в разных направлениях и на разном расстоянии от предприятия. Согласно представленным результатам (рис. 2.6), в исследуемый период времени содержание трития в воде разных озёр варьировало от 7 до 228 Бк/л при среднем значении 28 ± 8 Бк/л. Наиболее высокие его концентрации наблюдались в озёрах, расположенных вблизи предприятия (Татыш, Улагач, Наного).

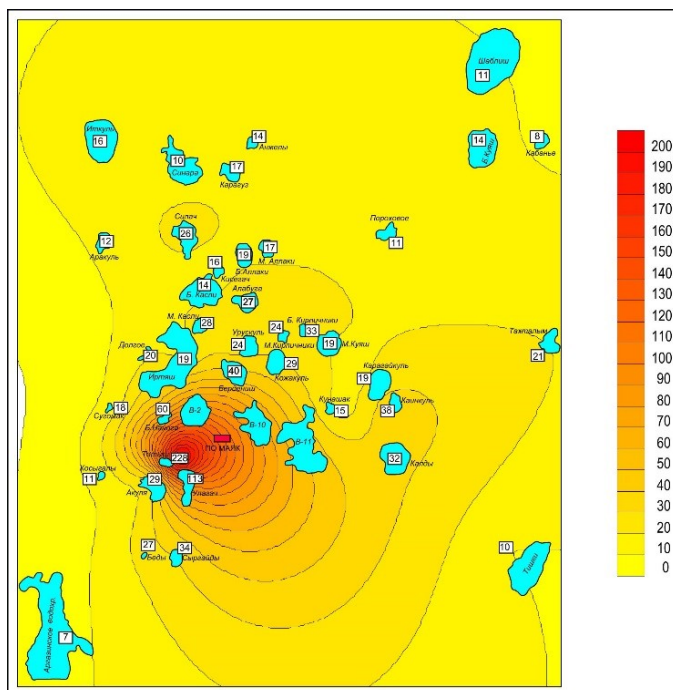


Рис. 2.6. Концентрации трития в водоёмах комплексного назначения, Бк/л

Результаты индивидуальных измерений концентраций трития в воде исследованных озёр представлены в зависимости от их расстояния до предприятия (рис. 2.7). Искомые расстояния измеряли с помощью компьютерной

программы Google Earth. Статистическая обработка данных показала, что концентрация радионуклида в воде озёр снижается по мере удаления от ПО «Маяк». Обратная связь концентраций трития в воде озёр с расстоянием до предприятия достоверно доказана при высоком уровне значимости ($p = 0,0075$).

На основании результатов исследований, представленных в работах [Иваницкая, Малофеева, 2002; Чеботина и др., 2005; Атлас..., 2007], сделана попытка оценить изменения в концентрациях радионуклида в воде озёр во времени (1986–2006 гг.). Для сравнения были выбраны 10 озёр, расположенных на разном расстоянии от предприятия (рис. 2.8).

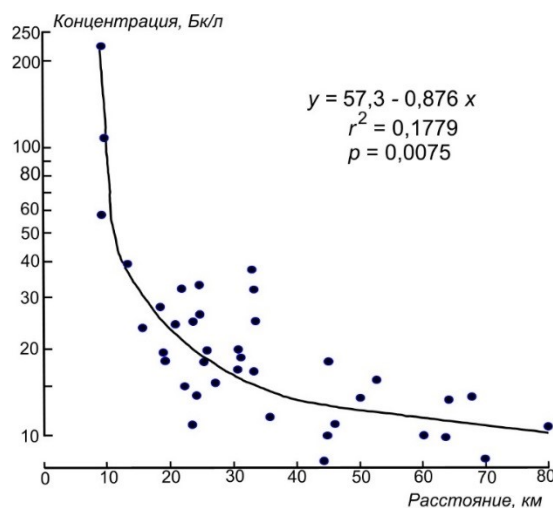


Рис. 2.7. Концентрации трития в водоёмах комплексного назначения в зависимости от их расстояния до предприятия ПО «Маяк»

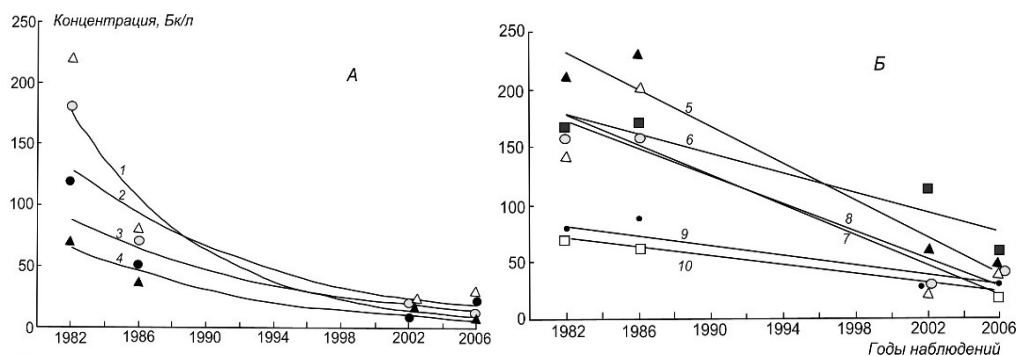


Рис. 2.8. Зависимость концентраций трития в воде озёр от времени наблюдения.

- А:** 1 — Анжелы ($y = 176,66 e^{-0,1295x}$; $R^2 = 0,967$; $p = 0,34$); 2 — Б. Касли ($y = 130,61 e^{-0,0857x}$; $R^2 = 0,817$; $p = 0,14$); 3 — Б. Куяш ($y = 88,405 e^{-0,0799x}$; $R^2 = 0,7749$; $p = 0,14$); 4 — Синара ($y = 64,543 e^{-0,0943x}$; $R^2 = 0,9914$; $p = 0,21$).
- Б:** 5 — Наного ($y = -8,0865x + 232,79$; $R^2 = 0,947$; $p = 0,027$); 6 — Улагач ($y = -4,385x + 179,87$; $r^2 = 0,895$; $p = 0,0539$); 7 — Иртяш ($y = -6,519x + 176,48$; $R^2 = 0,78$; $p = 0,115$); 8 — Кожаккуль ($y = -6,144x + 173,73$; $R^2 = 0,92$; $p = 0,039$); 9 — Алабуга ($y = -2,22x + 82,154$; $R^2 = 0,7795$; $p = 0,12$); 10 — Аргаяш ($y = -2,1x + 69,194$; $R^2 = 0,9988$; $p = 0,02$).

Результаты статистической обработки данных свидетельствуют о заметном снижении концентраций радионуклида во всех исследованных водоёмах в течение указанного периода наблюдений. Для трёх водоёмов (Аргаяш, Б. Нанога и Кожаккуль) снижение значимо ($p < 0,05$), для остальных, ввиду ограниченного количества данных, можно отметить лишь тенденцию к снижению, хотя различие между начальными и конечными значениями концентраций достигает от 2 до 16 раз (в среднем ~ 6 раз).

1.4. Дождевые осадки на промышленной территории

При выбросе трития в атмосферу радионуклид быстро распространяется в воздушном пространстве и под влиянием ветра переносится на большие расстояния. В местах распространения он поглощается поверхностью водных объектов. Дождевые и снеговые осадки, проходя через воздушное пространство, адсорбируют содержащийся в нем радионуклид, очищая тем самым атмосферный воздух, и способствуют осаждению трития на поверхность земли.

В 2007 г. для оценки поступления трития на земную поверхность в весенне-летне-осеннее время было исследовано содержание радионуклида в дождевых осадках, собранных на двух площадках завода 22 на промышленной территории ПО «Маяк». Площадка 307 находится вблизи реакторного производства, площадка 18 — в 2,5 км на северо-восток от неё. В качестве контроля служили осадки из окрестности г. Чебаркуль, расположенного на расстоянии 85 км от предприятия [Чеботина и др., 2012].

Концентрация трития в дождевой воде на исследованных площадках варьировала в широких пределах в зависимости от времени наблюдений. В частности, в районе расположения 18-й площадки она изменялась от 7 до 1160 Бк/л при среднем значении за год 382 ± 42 Бк/л (рис. 2.9, а). За период наблюдений наиболее высокие значения (1100 и 1160 Бк/л) отмечались дважды — в июне и октябре. На 307-й площадке содержание трития в дождевой воде изменялось от 20 до 2086 Бк/л при среднем значении 329 ± 81 Бк/л (рис. 2.9, б).

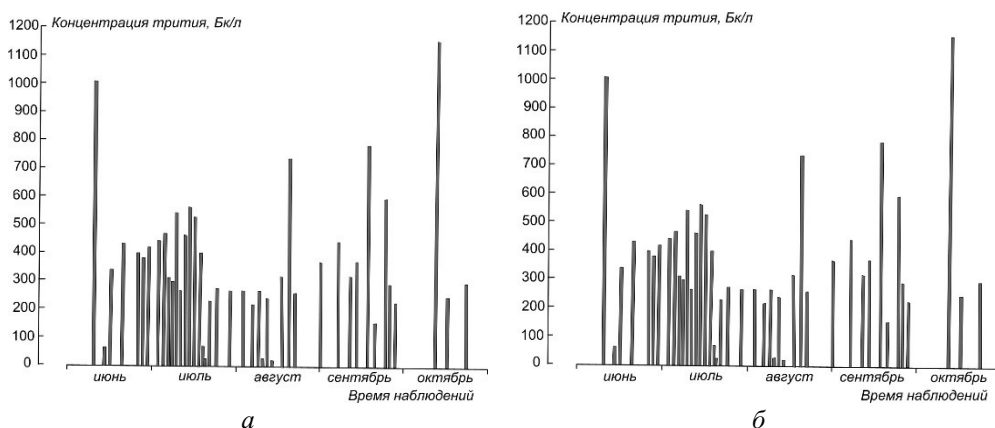


Рис 2.9. Динамика концентраций трития в дождевой воде в районе 18-й (а) и 307-й площадок (б) ПО «Маяк»

Наиболее высокое значение (2086 Бк/л) было зарегистрировано в качестве единичного наблюдения в первой половине октября. На обеих площадках основная часть проб осадков (95 %) по содержанию трития не превышала 800 Бк/л, при этом средние значения концентрации радионуклида в дождевой воде на этих площадках в 70–80 раз превышали уровень техногенного фона для Уральского региона.

В дождевых осадках в г. Чебаркуль выявлены значительно более низкие концентрации трития по сравнению с таковыми на промышленных площадках ПО «Маяк» (рис. 2.10). За исследованный период времени они изменялись в пределах 5–30 Бк/л при среднем значении 15 ± 2 Бк/л, что в 3 раза превышало уровень техногенного фона.

На основе полученных значений концентраций трития в дождевой воде и данных Гидрометслужбы о среднемесечном количестве осадков в исследованных регионах было рассчитано количество трития, поступившего на земную поверхность с дождём в течение всего периода наблюдений. Для промышленной территории ПО «Маяк» и г. Чебаркуль оно составило примерно 80–100 и 7 ГБк/км² соответственно.

Таким образом, в районе радиохимического завода ПО «Маяк» в период исследований наблюдались повышенные значения объёмной активности трития в атмосферных осадках по сравнению с контрольным регионом (г. Чебаркуль), уровнем техногенного фона для Уральского региона и уровнем глобального фона, что свидетельствует о предприятии как источнике выбросов трития. Повышенные значения концентраций трития в осадках наблюдались и в зоне, более удалённой от предприятия. По данным Росгидромета за 2003 г., среднегодовое содержание трития в осадках в п. Новогорный составляло 91,9 Бк/л, что в 37 раз превышало средние значения по территории России (2,5–2,8 Бк/л на 2003 г.) и в 18 раз уровень техногенного фона по Уральскому региону [Радиационная обстановка..., 2004]. На расстоянии 20 км от ПО «Маяк» содержание трития в осадках уменьшалось в 5 раз, но ещё значительно превышало фоновый уровень. Отмечено снижение концентрации радионуклида в осадках с увеличением расстояния от ПО «Маяк» (5 км — 70–95 Бк/л; 20 км — 10–20 Бк/л; 40–70 км — 10 Бк/л и меньше).

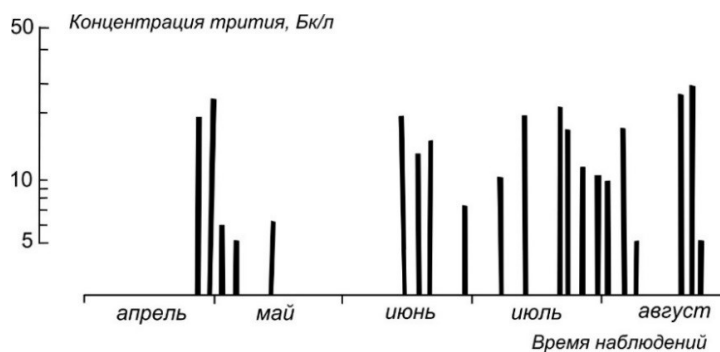


Рис. 2.10. Динамика концентраций трития в дождевой воде г. Чебаркуль

На примере пунктов наблюдения Аргаяш, Новогорный и Касли показаны сезонные изменения содержания трития в осадках: во втором полугодии 2003 г.

отмечена более высокая концентрация радионуклида в осадках по сравнению с первым полугодием. Для района ПО «Маяк» отмечена тенденция снижения концентрации трития в приземном слое воздуха, связанная с уменьшением объёма производства и выводом ряда реакторов из эксплуатации. Так, в 1980 г. среднегодовая концентрация радионуклида составляла 28,3 Бк/м³, в 1999 г. — 5,4 Бк/м³ [Демин, 2001].

Анализ литературных данных показал, что для других территорий, расположенных в районах размещения предприятий ядерно-топливного цикла в России и за рубежом, содержание трития в дождевых осадках было ниже, чем в районе ПО «Маяк», например, на территории Игналинской АЭС (Литва) в 1989 г. концентрация трития в осадках составляла 3,8 Бк/л [Мажейка, Пятрошюс, 1993], вблизи CNRL (Канада, Онтарио, 1996 г.) — 3,7 Бк/л [Workman et al., 1998], в Японии — 0,5–1,7 Бк/л [Okada, Monoshima, 1993].

По абсолютным значениям концентрации радионуклида в осадках в районе реакторного производства ПО «Маяк» ниже УВ, установленного для питьевой воды нормативами [Егоров, 2002; Нормы радиационной..., 2009]. Если же принять во внимание тот факт, что из воздуха при вдыхании радионуклид поступает непосредственно в организм человека, повышенные концентрации трития в воздушных выбросах ПО «Маяк» следует рассматривать в качестве негативного фактора, влияющего на здоровье людей.

1.5. Снежный покров

Снежные выпадения, как и дождевые осадки, служат хорошим индикатором загрязнения тритием воздушной среды. В течение зимнего сезона снежный покров хорошо удерживает в себе радионуклид, который он поглотил из воздуха в процессе прохождения снега через воздушное пространство.

Изучение содержания трития в снежном покрове в районе ПО «Маяк» проводили в 2004–2005 гг. с учётом различных направлений и расстояний от предприятия [Чеботина и др., 2014]. В целом исследованием была охвачена территория радиусом более 30 км. На рис. 2.11 представлена карта-схема, на которой указано местонахождение точек отбора проб и концентрация трития в снеговой воде. Видно, что содержание радионуклида в снеге на обследованной территории изменяется в широких пределах — от 6 до 262 Бк/л. Самый низкий показатель почти не отличается от уровня техногенного фона, при этом наиболее высокий — превышает его более чем в 50 раз. Повышенные концентрации обнаружены в непосредственной близости от предприятия.

Для того чтобы определить, изменение концентрации радионуклида в пробах снега в зависимости от расстояния до предприятия, были усреднены показатели для территорий, расположенных на разных расстояниях вокруг ПО «Маяк» — 0–10, 10–20, 20–30 и более 30 км. Расположение точек отбора по сторонам света при этом не учитывали. Из данных рис. 2.12 видно, что концентрация трития в снеговой воде снижается по мере удаления от предприятия. Судя по показателям средних значений, в радиусе до 10 км от ПО «Маяк» содержание радионуклида в снеге составляет 119 ± 45 Бк/л, в радиусе 10–20 км снижается примерно в 2 раза (65 ± 12 Бк/л), на расстоянии 20–30 км — 48 ± 5 Бк/л, 30–40 км — 44 ± 2 Бк/л, более 40 км — 25 ± 2 Бк/л.

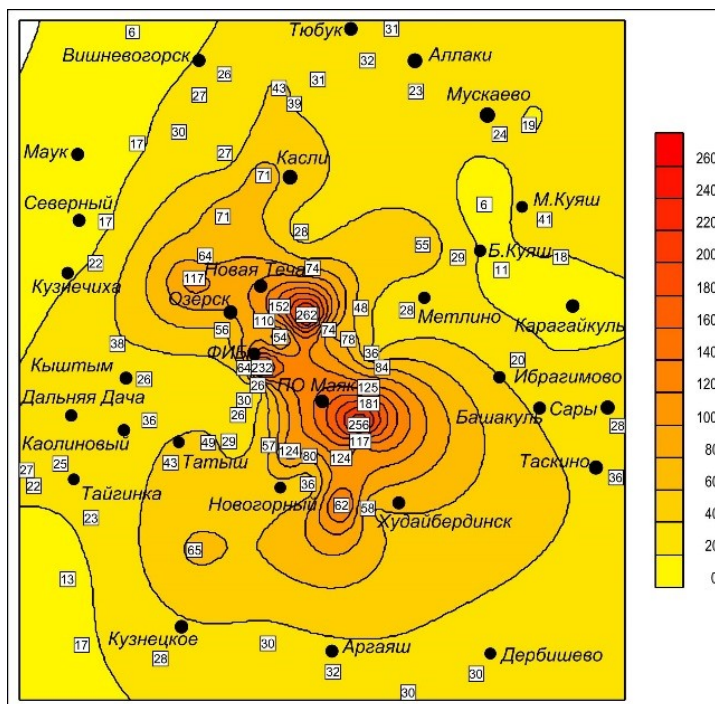


Рис. 2.11. Концентрации трития в воде из снега в районе ПО «Маяк», Бк/л

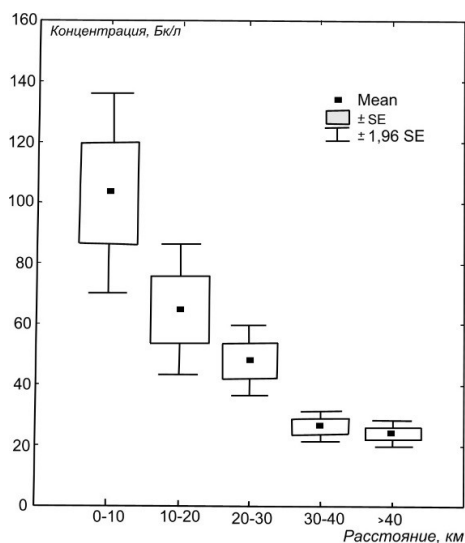


Рис. 2.12. Изменение средних концентраций трития в снеговой воде в зависимости от расстояния до ПО «Маяк»

30–40 км — 44 ± 2 Бк/л, более 40 км — 25 ± 2 Бк/л.

Результаты статистической обработки совокупности всех данных показали, что снижение концентрации радионуклида в снеговой воде в зависимости от расстояния до предприятия достоверно при высоком уровне значимости ($p < 0,05$).

Для того чтобы определить, изменение концентрации радионуклида в пробах снега в зависимости от расстояния до предприятия, были усреднены показатели для территорий, расположенных на разных расстояниях вокруг ПО «Маяк» — 0–10, 10–20, 20–30 и более 30 км. Расположение точек отбора по сторонам света при этом не учитывали. Из данных рис. 2.12 видно, что концентрация трития в снеговой воде снижается по мере удаления от предприятия.

Судя по показателям средних значений, в радиусе до 10 км от ПО «Маяк» содержание радионуклида в снеге составляет 119 ± 45 Бк/л, в радиусе 10–20 км снижается примерно в 2 раза (65 ± 12 Бк/л), на расстоянии 20–30 км — 48 ± 5 Бк/л,

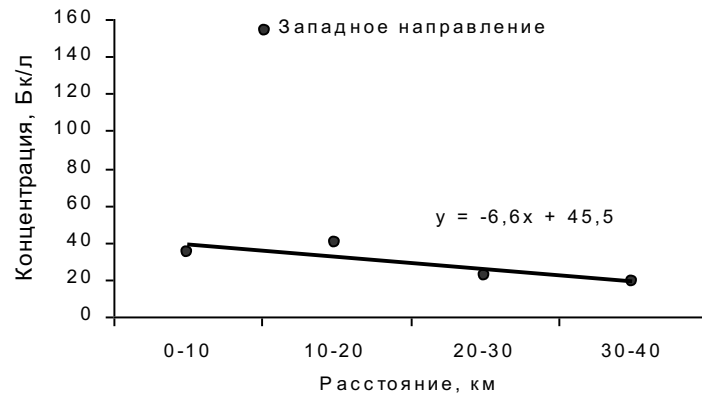
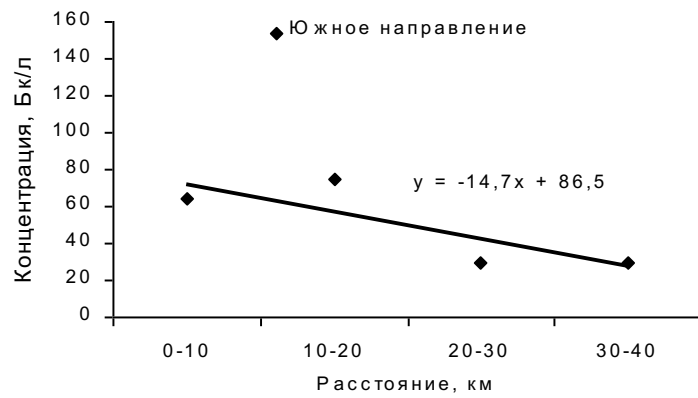
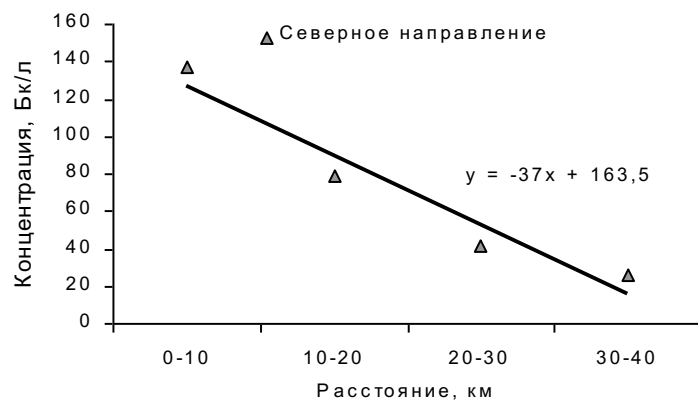


Рис. 2.13. Концентрации нитрата в снеговой воде в зависимости от направления от ПО «Маяк», Бк/л

Было исследовано распределение концентраций трития в снежном покрове в зависимости от направления по сторонам света. Для этого все пробы были ранжированы в зависимости от этих направлений и расстояний до предприятия. Установлено, что в радиусе до 10 км от ПО «Маяк» средняя концентрация трития в снеге имеет наиболее высокий показатель для северного (137 ± 32 Бк/л) и восточного (106 ± 40 Бк/кг) направлений и снижается в южном (64 ± 18 Бк/л) и западном (35 ± 8 Бк/л) направлениях. На расстоянии более 30 км все показатели имеют близкие значения и колеблются вокруг средней величины (рис. 2.13).

Указанное выше распределение концентраций трития в снежном покрове ближней зоны ПО «Маяк» в значительной степени может быть связано с преобладающим направлением ветров, которое формируется горным массивом Центрально-Уральского поднятия, расположенного на юго-запад от предприятия (рис. 2.14). Направление основных хребтов указанного горного массива с юго-запада на северо-восток отклоняет западные и северо-западные ветры на северо-восток, создавая в районе ПО «Маяк» специфическую розу ветров преимущественно северо-восточного направления. Это подтверждается, например, формой Восточно-Уральского радиоактивного следа [Особенности..., 2004; Использование модели..., 2005].

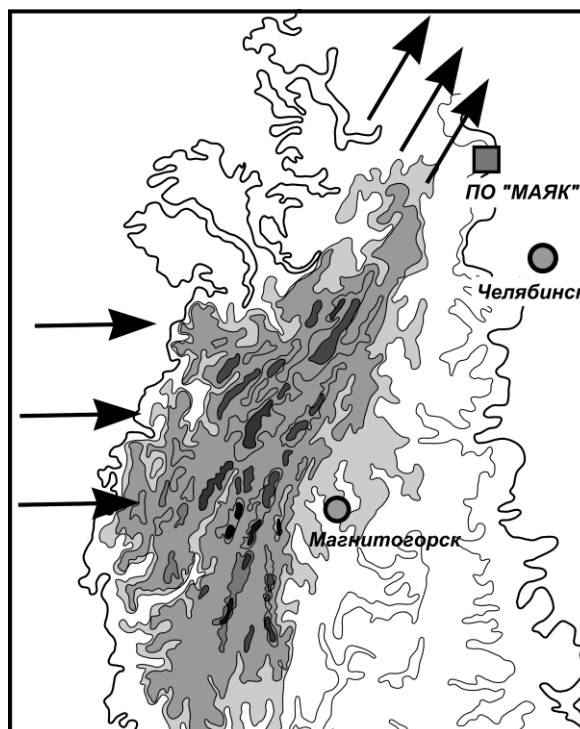


Рис. 2.14. Схема формирования розы ветров в районе ПО «Маяк»

Практически во всех пробах воды из снега концентрация трития была выше уровня техногенного фона, что свидетельствует о вкладе ПО «Маяк» в формирование этого загрязнения. В то же время все концентрации не достигали уровня вмешательства, регламентирующего содержание радионуклида в питьевой воде.

1.6. Источники питьевого водоснабжения

Качество питьевой воды является важным условием, необходимым для обеспечения здоровья населения. Источниками питьевого водоснабжения обычно служит вода колодцев, личных и артезианских скважин, родников. Предполагается, что в случае поверхностного антропогенного радиоактивного и химического загрязнения природной среды, при прочих равных условиях, глубинные источники водоснабжения, например артезианские скважины, являются более чистыми от загрязнений, чем питьевые источники, расположенные ближе к поверхности земли (родники, колодцы).

В 2005–2006 гг. были исследованы уровни концентрации трития в различных типах источников питьевой воды в 45-километровой зоне вокруг предприятия «Маяк» [Тритий в воде..., 2007; Чеботина и др., 2008; Тритий в водоёмах..., 2011].

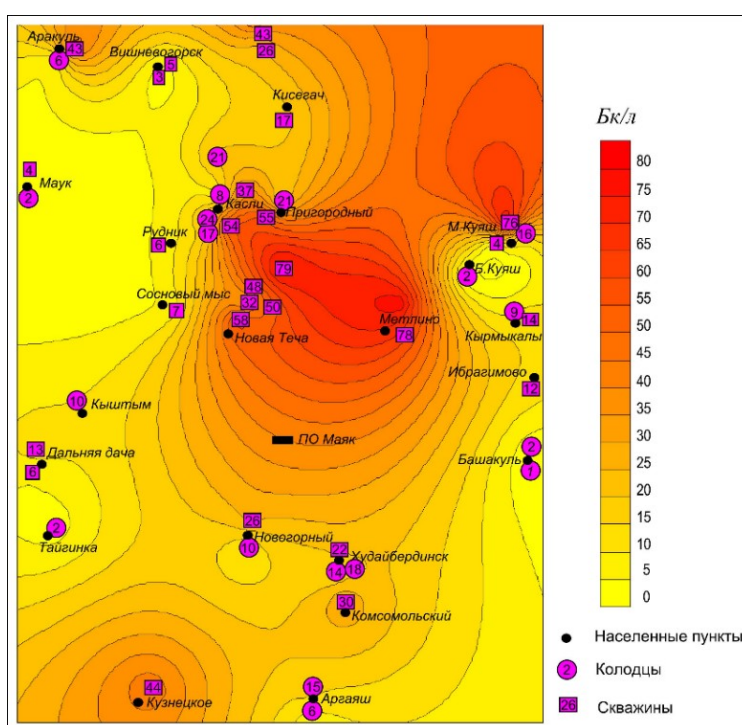


Рис. 2.15. Концентрация трития в воде колодцев и личных скважин в районе ПО «Маяк», Бк/л

Личные колодцы и скважины. На рис. 2.15 представлены данные о содержании трития в воде колодцев и личных скважин в пределах обследованной территории. Глубина колодцев варьировала от 2 до 10 м, скважин — от 6 до 40 м. Из рисунка видно, что содержание трития в воде колодцев варьировалось от уровня техногенного фона до 24 Бк/л, скважин — до 78 Бк/л. Ареал повышенных концентраций трития выявлен к северу от промзоны ПО «Маяк» (здесь пробы не отбирались), между пунктами Метлино — Новая Теча — Касли — Пригородный. Карта-схема также указывает на возможность наличия подобного

ареала ещё севернее — в направлении г. Снежинска, однако для его подтверждения необходимы более детальные исследования.

Поскольку колодцы и скважины имеют различную глубину, была исследована связь содержания трития в указанных водных источниках с глубиной источника (рис. 2.16). Заметим, что информацию о глубине личных скважин мы получали от их владельцев, поэтому здесь возможны неточности. Тем не менее статистическая обработка данных по весьма строгому методу Спирмена (Statistica 6.0) позволила выявить достоверную связь между концентрацией трития в воде и глубиной водного источника (уровень значимости $< 0,01$).

Согласно результатам статистической обработки, колодцы и скважины представляют собой две разные выборки, однако тот факт, что для этих выборок существует общая корреляционная связь по содержанию трития с глубиной источника, свидетельствует о том, что они связаны между собой одним преобладающим источником поступления трития. Так как содержание радионуклида в них с глубиной возрастает, можно предположить, что таким источником являются подземные глубинные воды. Это вполне увязывается с полученными данными, из которых следует, что концентрация трития в воде скважин (35 Бк/л) в среднем в 3,5 раза выше, чем в воде колодцев (10 Бк/л). Поскольку с северной стороны от ПО «Маяк» располагается серия водоёмов-отстойников Теченского каскада, а в южном и восточном направлениях находятся водоёмы В-9 (Карачай) и В-17 (Старое Болото) с концентрацией трития в диапазоне 10^3 – 10^6 Бк/л, то становится очевидным, что они являются возможным источником загрязнения питьевой воды колодцев и личных скважин в указанном регионе.

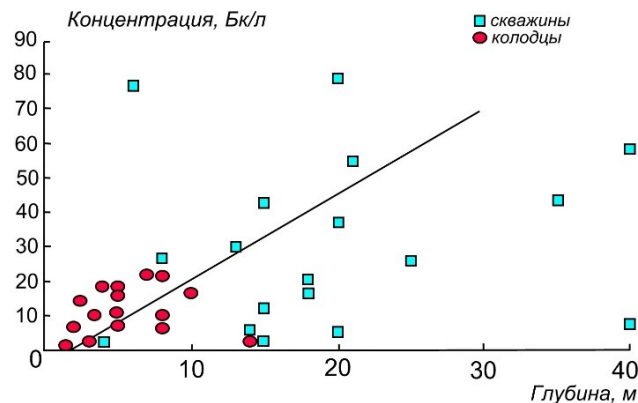


Рис. 2.16. Корреляционная связь между содержанием трития в воде колодцев и скважин зоны воздействия ПО «Маяк» и их глубиной

Источники централизованного водоснабжения. Значительная часть населения, проживающего в районе ПО «Маяк», использует воду из централизованных источников. В разных населённых пунктах она подаётся в водопроводную сеть из различных природных резервуаров: в одних случаях это специально пробуренные артезианские скважины, в других — открытые водоёмы (озёра Аракуль, Иртяш, Сугамак и Зацепинский пруд). Поэтому содержание трития в водопроводной воде разных населённых пунктов зависит от радиационной чистоты соответствующих водных источников (табл. 2.2).

Таблица 2.2

Уровни концентраций трития в воде населённых пунктов, подаваемой из централизованных источников (сетевая водопроводная вода и вода артезианских скважин), 2004 г.

Пункт наблюдения	Концентрация трития, Бк/л	Пункт наблюдения	Концентрация трития, Бк/л
Метлино	39; 78*	Дальняя Дача	13
Кыштым	36; 26; 22*	Детский пионерлагерь	13
Вишневогорск	42; 46*	Кузнецкое	14
Кызылбулак	50	Маук	6
Касли	14; 60*	Аргаяш	2
Худайбердинск	51	Рудник	6
Новогорный	16; 60*		

* Разное время наблюдений.

Из табл. 2.2 видно, что содержание трития в воде центрального водоснабжения в исследованных населённых пунктах варьирует от уровня техногенного фона до 60 Бк/л. Наиболее низкие значения отмечены для н. п. Аргаяш, Маук, Рудник, наиболее высокие — для н. п. Касли, Новогорный, Худайбердинск, Кызылбулак, Вишневогорск.

Родники представляют собой естественные выходы подземных вод на поверхность земли. Количество и качество родниковой воды зависит от дебита и глубины залегания водоносного горизонта, её экологическая чистота определяется наличием или отсутствием фактора проникновения химических и радиоактивных загрязнителей в питающий водоносный горизонт, а также их атмосферными выпадениями и притоком с поверхностными водами. В районе исследования найдено 9 родников, значения концентрации трития в которых варьировали от уровня техногенного фона до 44 Бк/л.

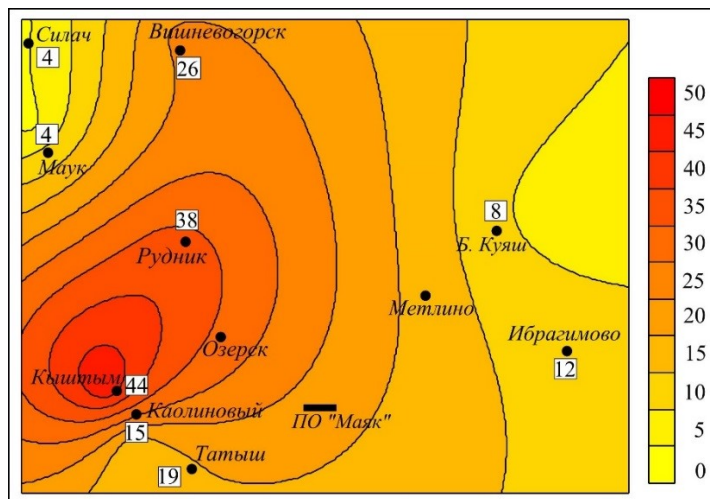


Рис. 2.17. Уровни содержания трития в родниковой воде, Бк/л

Изолинии (рис. 2.17) свидетельствуют о наличии в родниковой воде повышенных концентраций радионуклида в зоне, приближенной к ПО «Маяк» (Кыштым, Рудник, Татыш), и меньших — в более удалённом районе (Силач, Маук, Куяш, Ибрагимово).

1.7. Водная экосистема реки Теча

Река Теча является правым притоком реки Исеть, впадающей в реку Тобол. Вместе с рекой Иртыш они относятся к гидрографической системе реки Обь, впадающей в Северный Ледовитый океан.

Теча берёт свое начало из оз. Иртыш, сток воды из озера в реку зарегулирован плотиной П-1. Как отмечалось выше, в период строительства и функционирования ПО «Маяк» в верхней части русла реки Теча была создана система гидротехнических сооружений, включающих каскад производственных водоёмов, плотины и обводные каналы. Ниже места впадения в реку обводных каналов Теча на значительном расстоянии протекает по широкой долине с множеством болот. Большую территорию занимают болота в районе населённого пункта Асаново (Асановские болота) общей протяжённостью приблизительно 10 км и шириной около 2 км.

Русло в этом районе выражено нечётко, река протекает небольшими протоками. В среднем и нижнем течении (от с. Муслумово и ниже) она расширяется и углубляется, приобретает чёткое умеренно-извилистое русло с плёсами и перекатами, отмелями и косами. Берега реки несимметричные: часто очень крутому или обрывистому берегу соответствует низкий пологий противоположный берег. Дно реки в основном песчаное и песчано-каменистое, местами скальное. В местах углубления дна при замедленном течении встречаются илистые и песчано-илистые донные отложения. Более детальное описание морфологических и гидрографических характеристик реки приведено в работе [Мокров, 2002а, б].



Рис. 2.18. Карта-схема расположения точек отбора проб в районе реки Теча

Район исследования (рис. 2.18) включал реку Теча в среднем и нижнем ее течении от с. Муслумово до с. Затеченское, а также населённые пункты, расположенные по берегам и по трансекте от реки Теча до дер. Барабановское на её левом берегу.

Мониторинг трития в реке Теча в районе с. Муслумово в период 2005–2009 гг. (рис. 2.19) показал, что в разные периоды наблюдений его концентрация в воде варьировала в широких пределах — от 30 до 600 Бк/л при среднем значении 250 Бк/л.

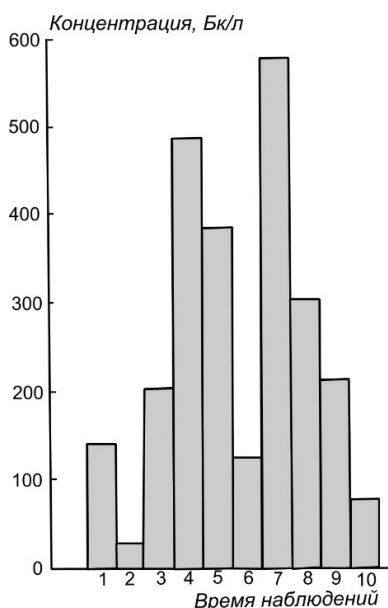


Рис. 2.19. Содержание трития в воде реки Теча в районе н. п. Муслиумово в разные периоды наблюдений:
 1 — 01.06.05; 2 — 08.08.07; 3 — 05.12.07;
 4 — 27.05.08; 5 — 26.09.08; 6 — 9.12.08;
 7 — 10.12.08; 8 — 14.01.09; 9 — 13.03.09;
 10 — 29.06.09

проживающего в прибрежной зоне населения. Известно, что в соответствии с программой реабилитации загрязнённой территории для снижения поступления радионуклидов в питьевую воду жителей в населённых пунктах, находящихся вдоль загрязнённой реки, были пробурены глубинные скважины (до 100–180 м), из которых вода подаётся в колонки, расположенные на территории этих населённых пунктов (сетевая вода). Вместе с тем, население употребляет воду колодцев, родников и личных скважин меньшей глубины.

На рис. 2.20 представлены концентрации трития в воде реки Теча на разном расстоянии от плотины П-11, полученные в 2005 и 2010 гг. Видно, что в речной воде среднее содержание радионуклида в указанные периоды наблюдений было примерно одинаково и в целом снижалось на исследуемом участке реки от 130 до 70 Бк/л.

Приведённые на рис. 2.20 данные свидетельствуют о том, что река Теча на всём своём протяжении несёт повышенные концентрации радионуклида, превышающие уровень техногенного фона в среднем от 10 до 30 раз, однако в отдельные периоды наблюдений уровень техногенного фона превышал 100 и более раз [Мокров, 2002а, б].

В связи с постоянным потоком повышенных концентраций трития с водами реки Теча представляло интерес определить, как влияет её загрязнение на содержание радионуклида в питьевой воде

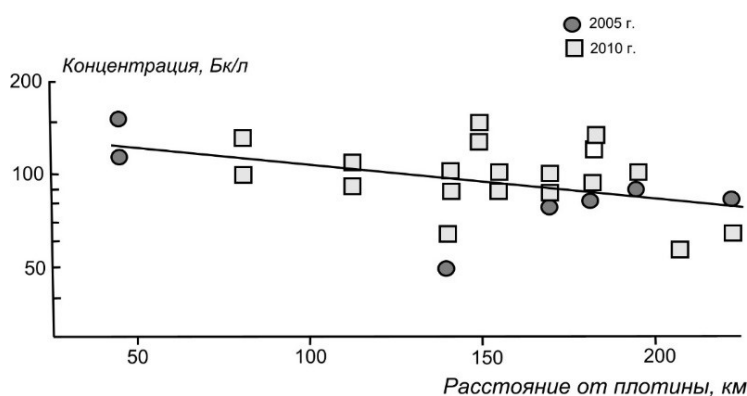


Рис. 2.20. Уровни концентраций трития в воде реки Теча на разном расстоянии от плотины П-11

Для оценки содержания трития в воде различных питьевых источников, расположенных в пойме реки Теча, в 2005–2010 гг. производили отбор проб воды в населённых пунктах: Муслимово (в настоящее время жители отселены), Бродокалмак, Русская Теча, Лобаново, Анчугово, Верхняя Теча, Бугаево, Шутиха, Першинское, Затеченское, Долматово. Объектами исследования служила как сетевая вода, так и другие типы питьевой воды, используемой населением.

Анализ полученных результатов показал, что сетевая вода, поступающая в колонки из глубинных скважин, содержит более высокие концентрации радионуклида, чем вода личных скважин, колодцев и родников с меньшей глубиной. В среднем различие составило 2–3 раза (рис. 2.21).

Уровни концентраций трития в сетевой воде имеют тенденцию к снижению по мере удаления от плотины, тогда как в воде колодцев, родников и личных скважин содержание радионуклида практически одинаково на всем протяжении реки. Статистическая обработка всей совокупности данных (рис. 2.22) показала высоко достоверное различие между концентрациями трития в сетевой воде, поступающей из глубинных скважин, и содержанием радионуклида в воде менее глубоких питьевых источников, которыми пользуются жители населенных пунктов (уровень значимости $p = 0,0016$).

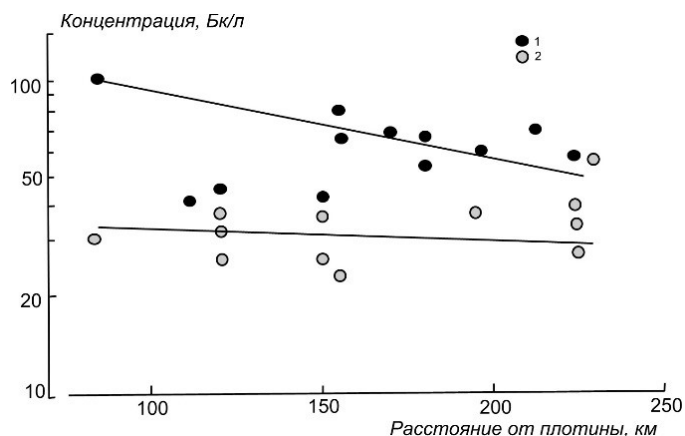


Рис. 2.21. Уровни содержания трития в источниках питьевого водоснабжения жителей населённых пунктов, расположенных в пойме реки Теча: 1 — сетевая вода; 2 — вода личных скважин, колодцев, родников

Повышенное содержание трития в сетевой воде, поступающей из глубинных скважин, по всей вероятности, объясняется тем, что русло реки Теча расположено в зоне разлома земной коры, по которому идёт фильтрация загрязнённой радионуклидом воды из производственных водоёмов, находящихся в верхней части зарегулированного русла реки [Уткин, 1997; Атлас..., 2007]. Как показано выше, вода производственных водоёмов, расположенных в русле реки Теча, содержит значительно более высокие концентрации и запас радионуклида по сравнению с остальными водными резервуарами в зоне воздействия ПО «Маяк». Наличие прямой экспоненциальной зависимости между концентрацией трития в воде производственных водоёмов и их расстоянием до истока реки (см. рис. 2.3), а также наличие аналогичной связи между концентрациями радионуклида в сетевой воде населённых пунктов, расположенных в пойме реки Теча, и их расстоянием от плотины П-11 (см. рис. 2.21) подтверждает тот факт,

что производственные водоёмы и река Теча объединены в гидрогеологическую сеть, по которой вниз по течению происходит подземная глубинная фильтрация загрязнённых вод, поступающих с ПО «Маяк». Из наиболее глубоких водоносных горизонтов этой водной сети (100 м и более) тритиевое загрязнение поступает в пробуренные глубинные скважины, при помощи которых обеспечивается водоснабжение населенных пунктов через сеть колонок.

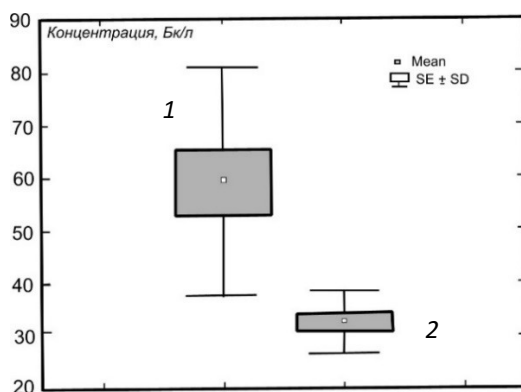


Рис. 2.22. Результаты статистической обработки данных по питьевой воде в населённых пунктах (пойма реки Теча): 1 — сетевая вода; 2 — вода личных скважин, колодцев, родников

В отличие от глубинных вод, имеющих связь с производственными водоемами, воды других питьевых источников (колодцев, менее глубоких личных скважин), расположенных в пойме реки Теча, подпитываются отчасти за счет воды самой реки, атмосферных выпадений и поверхностных вод прилегающей территории, поэтому концентрация трития в них меньше.

В связи с этим было интересно установить, проявляется ли различие в концентрациях трития между глубинными и поверхностными водами питьевых источников в отдалении от основного русла реки Теча. Для этой цели были обследованы водные источники в пунктах наблюдений, расположенных на левом берегу реки по трансекте между н. п. Барабановское и рекой Теча (см. рис. 2.18). Следует заметить, что сетевая вода в этих пунктах наблюдений практически отсутствует. Среди прочих водных источников имеются сравнительно глубокие скважины, которые отмечены на рисунке (Петропавловское — 60–80 м; Кирды — 90 м; Иксаново — 68 м; Нижняя — 33 м). Значения концентраций трития в различных питьевых источниках в зависимости от их расстояния до русла реки Теча представлены на рис. 2.23.

Как оказалось, в стороне от русла концентрации трития во всех питьевых источниках, в том числе и в сравнительно глубоких скважинах, имеют близкие значения (от 5 до 15 Бк/л), которые заметно ниже аналогичных значений для сетевой воды из глубинных скважин в пойме реки (см. рис. 2.21).

Таким образом, повышенные концентрации радионуклида в воде глубинных источников отмечены лишь в пойме реки Теча. Из работы следует практический вывод: для снижения поступления трития в организм с питьевой водой жителям предпочтительно использовать колодцы, родники и неглубокие личные скважины, а не сетевую воду, поступающую из глубинных скважин.

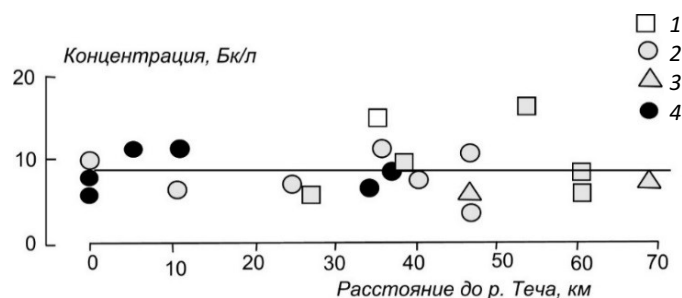


Рис. 2.23. Содержание триэтиламина в воде питьевых источников, расположенных по трансекте на разном расстоянии от русла реки Теча: 1 — колодцы; 2 — личные скважины глубиной до 20 м; 3 — родники; 4 — сетевая вода и частные скважины глубиной более 30 м

1.8. Водная экосистема реки Мишеляк

Река Мишеляк берет своё начало из оз. Улагач, далее проходит по южной границе санитарно-защитной зоны ПО «Маяк» и впадает в правобережный обводной канал. Она перекрывает поток фильтрационных вод в южном направлении от производственных водоемов ПО «Маяк». Считается, что основные поставщики триэтилового загрязнения этой территории — водоёмы В-9 и В-17 (рис. 2.24).

Наличие разломов земной коры и других гидрогеологических нарушений на территории создаёт предпосылки для проникновения фильтрующихся из производственных водоёмов вод в водоносные горизонты в интервале глубин до 100–150 м и для распространения их в северном и южном направлениях [Иваницкая, Малофеева, 2002]. Миграция загрязнённых вод, поступивших в подземные горизонты, происходит в соответствии со структурой потока, водоносностью и трещиноватостью пород. Для изучения химического состава поверхностных и подземных вод и скорости продвижения потока загрязнения на ПО «Маяк» создана режимная наблюдательная сеть, которая включает более 3000 действующих и законсервированных скважин, пробуренных с 1942 по 2005 гг. [Атлас..., 2007].

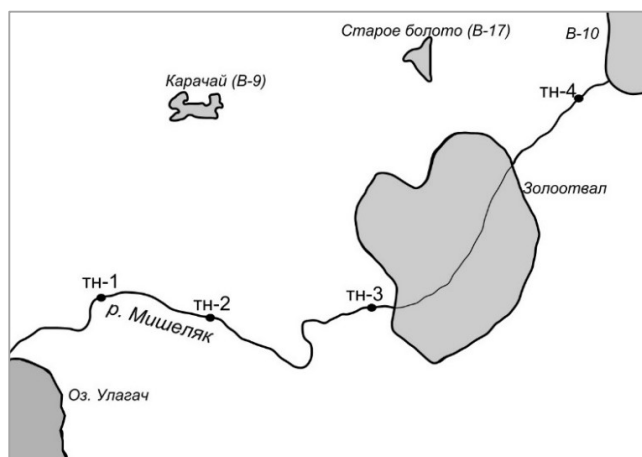


Рис. 2.24. Схема расположения точек наблюдений (тн) в русле реки Мишеляк

Исследование концентраций трития в воде реки Мишеляк проводили в период 2007–2009 гг. (рис. 2.25). В 2007 г. концентрация трития в воде этой реки зарегистрирована на уровне 30–40 Бк/л, в 2008 г. — 50–90 Бк/л, а в 2009 г. она варьировала от 150 до 230 Бк/л. Таким образом, согласно примерной оценке, в течение периода наблюдений вынос трития с водами реки возрос примерно в 5 раз. Уровни концентраций радионуклида незначительно варьировали на протяжении всей реки. Приведенные данные свидетельствуют о том, что река на всем своем протяжении более или менее равномерно дренирует прилегающую территорию и выносит тритиевое загрязнение через правобережный канал в реку Теча.

Уровни концентраций радионуклида в глубинных скважинах, расположенных в пойме реки Мишеляк, представлены на рис. 2.26.

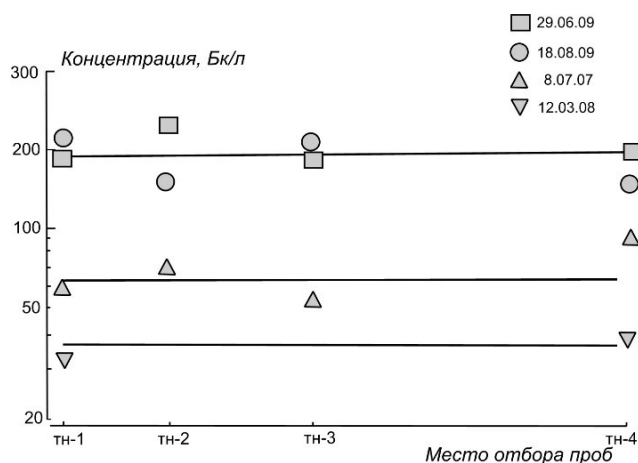


Рис. 2.25. Уровни концентраций трития в воде реки Мишеляк в разные сроки наблюдений

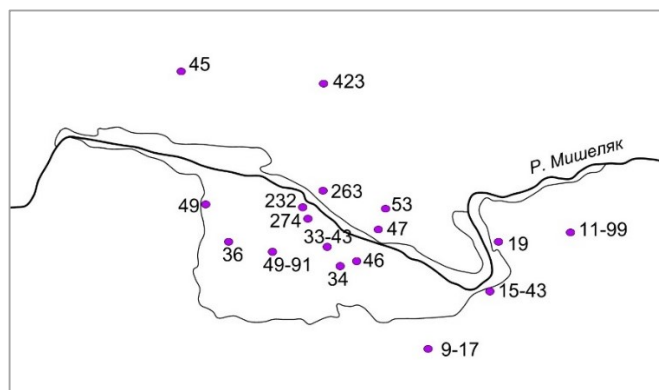


Рис. 2.26. Содержание трития в воде скважин наблюдения в пойме реки Мишеляк, Бк/л

В исследованных скважинах содержание трития варьировало от 9 до 423 Бк/л при среднем значении $100 \pm$ Бк/л, при этом среднее значение превышало уровень техногенного фона по тритию для Уральского региона в 20, а самое высокое —

в 80 раз. Хотя приведенные на рисунке показатели ниже уровня вмешательства, регламентирующего содержание трития в питьевой воде, повышенные концентрации радионуклида во внутрпочвенных водах в южном направлении от производственных водоемов ПО «Маяк» могут служить источником тритиевого загрязнения питьевых вод поселков Новогорный, Кызылбулак и Худайбердинский.

1.9. Район г. Озерска

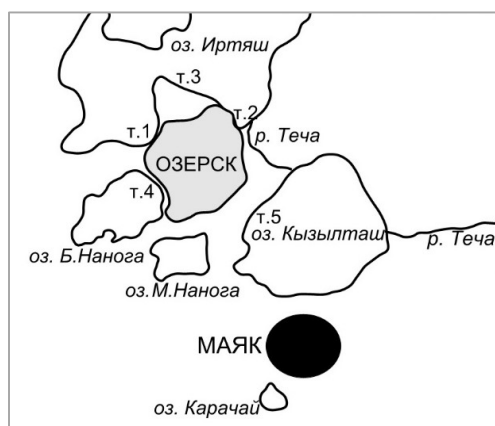


Рис. 2.27. Карта-схема расположения точек наблюдений (1–5) в районе г. Озерска: 1 — оз. Иртыш, б/о «Отважный»; 2 — оз. Иртыш в истоке реки Теча; 3 — место забора воды для снабжения г. Озерска питьевой водой (городской водопровод); 4 — оз. Б. Наного; 5 — оз. Кызылташ

В районах размещения крупных ядерных объектов необходимо исследование радиозэкологической обстановки в городах, где проживает население. Таким городом является Озерск, строительство которого (1945 г.) тесно связано с реализацией атомного проекта Советского Союза и строительством ПО «Маяк» — первого в стране предприятия атомной промышленности (рис. 2.27). Озерск находится в Челябинской области на берегу оз. Иртыш, его площадь — 657,32 км², население на 2018 г. составляло 83 217 человек. На примыкающей к нему территории расположены озёра Большая и Малая Наного и промышленный водоём Кызылташ. У северо-восточной окраины города протекает река Теча.

Объектами исследования в г. Озерске и на прилегающей к нему территории служили дождевые и снеговые осадки, вода озёр Иртыш, Б. Наного и истока реки Теча, а также водопроводная вода города, лед из холодильника,

Дождевые осадки. На рис. 2.28 представлены данные мониторинга трития в атмосферных осадках г. Озерска. Для сравнения на рисунке показаны значения концентраций радионуклида в осадках городов Чебаркуль и Екатеринбург, расположенных на расстояниях приблизительно 100 км на юго-восток и 120 км на юг от Озерска соответственно. Среди указанных пунктов наблюдений наиболее высокие концентрации трития зарегистрированы в осадках г. Озерска, где в разные месяцы они изменялись от 11 до 430 Бк/л при среднем значении 70 ± 16 Бк/л. В то же время в г. Чебаркуль среднее значение концентраций трития в дождевых осадках ($15 \pm 1,5$ Бк/л) было почти в 5 раз меньше, чем в Озерске (разброс данных индивидуальных измерений от 5 до 28 Бк/л). В Екатеринбурге дождевые и снеговые осадки в 2013 г. содержали примерно в 4 раза меньше трития, чем осадки Озерска (от 6 до 50 Бк/л при среднем значении 18 ± 1 Бк/л). Статистическая обработка данных показала достоверность различий по содержанию трития в осадках между городами Озерск и Чебаркуль (уровень значимости $p = 0,01$), Озерск и Екатеринбург ($p = 0,0004$) и отсутствие значимых различий между городами

Чебаркуль и Екатеринбург ($p > 0,05$). Во всех пунктах наблюдений средние концентрации трития в осадках превышают уровень техногенного фона для Уральского региона.

Снег. Сведения о концентрациях трития в снежном покрове разных мест территории г. Озерска в 2005 г. представлены на рис. 2.29, из которого видно, что содержание радионуклида в снеговой воде варьирует от 28 до 152 Бк/л при среднем значении 54 ± 13 Бк/л. Полученные данные показывают, что уровень техногенного фона для Уральского региона превышен от 5 до 30 раз.

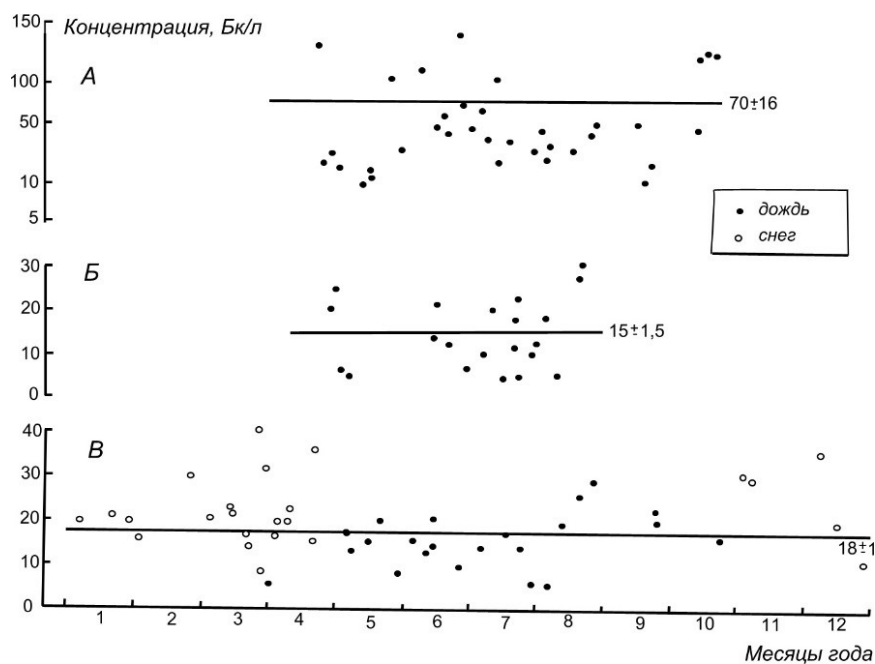


Рис. 2.28. Уровни концентрации трития в атмосферных осадках городов: А — Озерск (2007 г.), Б — Чебаркуль (2007 г.), В — Екатеринбург (2013 г.)

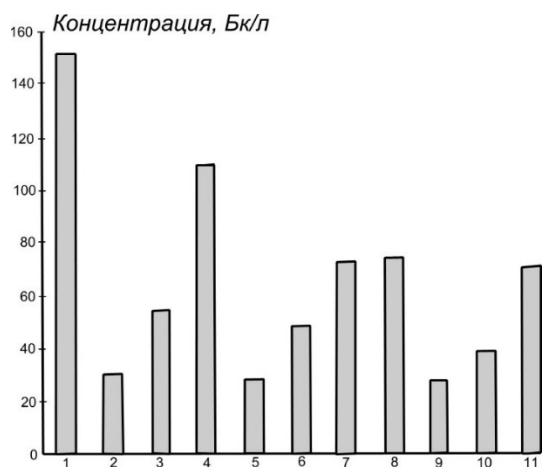


Рис. 2.29. Средние концентрации трития в снеговой воде г. Озерска в различных точках наблюдений (1–11) в пределах городской территории

Озёра. В табл. 2.3 приведены данные о концентрации трития в воде озёр, расположенных в периферийной зоне г. Озерска, из них Иртяш (площадь — ~ 60 км², глубина — 12–22 м) — одно из самых крупных озёр Челябинской области, является источником питьевого водоснабжения жителей города и основным поставщиком воды для нужд ПО «Маяк». Водоём используется для отдыха и водоснабжения населения, рыбозаведения и любительской ловли рыбы, на его западном берегу находится большое количество баз отдыха. Согласно единичным данным, содержание трития в воде оз. Иртяш составляет 18–21 Бк/л, что примерно в 4 раза превышает уровень техногенного фона для Уральского региона.

Озеро Большая Наного (площадь — 5,3 км², средняя — глубина 4,2 м) примыкает с юго-запада к г. Озерску, соединено протоками с оз. Иртяш. В результате сброса в водоём промышленных и бытовых стоков г. Кыштым вода в нём загрязнена тяжелыми металлами, фосфатами, марганцем и прочими химическими веществами. По данным за 2016 г., концентрация трития в его воде составляла 32 ± 1 Бк/л, что примерно в 6 раз выше уровня техногенного фона.

Озеро Кызылташ (площадь — 19 км², средняя глубина — 3,4 м) — водоём-охладитель прямоточных ядерных установок ПО «Маяк». Расположено примерно в 2 км от г. Озерска. В него, наряду с технологическим сбросом тёплых вод, поступают коммунальные стоки и ливневая канализация с промплощадок атомного предприятия и г. Озерска. Озеро имеет мощный слой иловых донных отложений (до 8 м), в которых сконцентрировано значительное количество химических и радиоактивных веществ [Смагин, 2007]. Согласно полученным данным, содержание трития в воде озера в зависимости от времени наблюдений варьировало от 3187 до 15300 Бк/л при среднем значении 6330 ± 1120 Бк/л.

Таблица 2.3

Уровни концентраций трития в воде озёр Иртяш, Б. Наного, Кызылташ

Озеро	Дата отбора проб	Концентрация трития, Бк/л
Иртяш (рис. 2.1, т. 1)	29.05.2007	$18,6 \pm 0,9$
	05.2016	$17,9 \pm 0,6$
	05.2016	$21,0 \pm 0,8$
Б. Наного (рис. 2.1, т. 4)	05.2016	$32,5 \pm 1,1$
Кызылташ (рис. 2.1, т. 5)	29.05.2007	4600
	05.12.2007	7044 ± 103
	18.01.2008	7161 ± 56
	30.06.2008	7010 ± 304
	18.08.2008	4651 ± 240
	05.11.2008	3513 ± 216
	09.12.2008	8153 ± 396
	12.02.2009	6477 ± 103
	14.04.2009	3187 ± 200
	12.08.2009	7352 ± 60
	25.09.2009	7039 ± 1278
	05.2016	15330 ± 289

Питьевая и замороженная вода. При рассмотрении источников поступления трития в питьевую воду населения г. Озерска следует подчеркнуть, что вода в жилые дома подаётся из оз. Иртяш. Исследование концентраций трития в водопроводной воде и в воде из замороженного в холодильнике льда (табл. 2.4) показало, что содержание радионуклида в обоих случаях варьирует от 10 до 150 Бк/л, однако средние значения концентраций трития в воде из замороженного льда оказались примерно в 2 раза выше (97 ± 20 Бк/л), чем в водопроводной воде (44 ± 7 Бк/л).

Таблица 2.4

Уровни концентраций трития в водопроводной воде и замороженной в холодильнике ледяной массе в г. Озерске

Время отбора пробы	Концентрация трития, Бк/л	Время отбора пробы	Концентрация трития, Бк/л
Водопроводная вода		Водопроводная вода	
31.01.2002	$21,1 \pm 4,6$	09.2010	$94,9 \pm 40$
24.02.2002	$22,8 \pm 0,2$	10.2010	$93,9 \pm 14$
24.03.2002	$18,0 \pm 0,4$	11.2010	$28,2 \pm 1,7$
07.2003	$47,1 \pm 0,6$	12.2010	$36,7 \pm 0,8$
18.05.2004	$35,1 \pm 0,7$	01.2011	$23,5 \pm 2$
06.2004	$43,2 \pm 0,4$	02.2011	$27,1 \pm 1,7$
01.04.2005	50 ± 2	03.2011	$10,2 \pm 0,5$
03.2010	$10,4 \pm 0,9$	04.2011	$24,2 \pm 2,6$
04.2010	$115,2 \pm 32,0$	05.2011	$19,5 \pm 1,9$
05.2010	$154,2 \pm 83,5$	06.2011	$39,4 \pm 2,7$
06.2010	$86,8 \pm 44,5$	07.2011	$34 \pm 1,3$
07.2010	53 ± 12	08.2011	$19,1 \pm 0,3$
08.2010	$38,6 \pm 4$	05.2016	$9,7 \pm 0,3$
Среднее	44 ± 7		
Лёд из холодильника		Лёд из холодильника	
31.05.2004	$87,1 \pm 0,5$	06.2010	$149,2 \pm 47,1$
02.2010	107 ± 18	07.2010	$10,7 \pm 3$
03.2010	$120,2 \pm 48,2$	08.2011	$87,1 \pm 0,5$
05.2010	$107,8 \pm 17,6$		
Среднее	97 ± 20		

Статистическая обработка данных показала, что это различие достоверно ($p = 0,003$). Двукратное различие по содержанию радионуклида в водопроводной воде и замороженной ледяной массе можно объяснить разными источниками поступления в них трития. В процессе намораживания радионуклид попадает в лёд из воздуха, а в водопроводную воду он поступает преимущественно из оз. Иртяш. Приведённые в работе [Чеботина и др., 2012] данные позволяют предположить, что воздушные выбросы ПО «Маяк» являются одним из основных источников загрязнения территории города тритием.

Исток реки Теча. Как упомянуто выше, Теча берёт свое начало в оз. Иртяш, затем уходит за пределы города в промзону ПО «Маяк». Основные притоки — реки Мишеляк, Зюзелга и Басказык. В старом русле реки Теча между озёрами Иртяш и Кызылташ создан искусственный буферный водоём (В-1), значительная часть которого представляет собой болото, заросшее тростником [Смагин, 2007].

Согласно результатам (табл. 2.5), содержание трития в истоке реки Теча в период наблюдений варьировало от 20 до 130 Бк/л при среднем значении 69 ± 7 Бк/л. При этом индивидуальные значения концентраций от 4 до 26 раз превышали уровень техногенного фона, принятый для Уральского региона.

Таблица 2.5

Уровни концентраций трития в воде истока реки Теча

Время отбора пробы	Концентрация трития, Бк/л	Время отбора пробы	Концентрация трития, Бк/л
03.2010	$115,9 \pm 21,9$	02.2011	$20,0 \pm 1,3$
04.2010	$97,1 \pm 37,7$	03.2011	$92,8 \pm 1,5$
05.2010	$121,9 \pm 48,2$	04.2011	$98,6 \pm 1,3$
07.2010	$129,4 \pm 27,0$	05.2011	$32,0 \pm 1,7$
08.2010	$84,4 \pm 10,0$	06.2011	$67,2 \pm 2,0$
09.2010	$116,4 \pm 3,3$	07.2011	$21,2 \pm 1,3$
10.2010	106 ± 22	08.2011	$37,4 \pm 1,1$
12.2010	$25,9 \pm 0,5$	09.2011	$29,1 \pm 1,3$
01.2011	$29,3 \pm 0,7$	12.2011	$25,9 \pm 0,5$
Среднее			69 ± 7

Сравнение усреднённых результатов (табл. 2.4 и 2.5) показало, что в точке 2 концентрация трития примерно на 40 % выше, чем в питьевой воде, местом забора которой служит точка 3 оз. Иртяш. Указанное различие статистически достоверно ($p = 0,04$). Возможным объяснением этого может быть то обстоятельство, что точка 2 расположена ближе к оз. Кызылташ, чем точка 3. В связи с этим возможен подток загрязнённой тритием воды из расположенных под буферным водоёмом и оз. Кызылташ глубинных водоносных горизонтов. Кроме того, испарение воды с поверхности содержащего повышенные концентрации радионуклида водоёма-охладителя может вносить определённый вклад в надфоновое загрязнение тритием указанной зоны оз. Иртяш.

Глава 2. Белоярская АЭС имени И.В. Курчатова

2.1. Характеристика района исследований

Белоярская атомная электростанция (БАЭС) — первая крупная промышленная АЭС и первый крупный гражданский объект ядерной энергетики в мире — расположена на Среднем Урале в Свердловской области на территории Белоярского городского округа. Площадь округа составляет 1321 км^2 , в его состав входят 45 населённых пунктов, в которых проживает 34,8 тыс. человек. Территория

относится к тагило-исетскому плоскоувалистому макрорайону таежной области Урала. Климат района резко континентальный с продолжительной суровой зимой и сравнительно коротким теплым летом. Годовая сумма осадков приблизительно 450 мм. Зимой преобладают ветра западного и юго-западного, а летом — северо-западного направлений. Окрестности АЭС в пределах 30-километровой наблюдаемой зоны представляют собой слабохолмистую равнину, покрытую преимущественно березово-сосновыми лесами. Леса носят следы интенсивного воздействия человека. Почвенный покров представлен преимущественно буроземами, серыми и дерново-подзолистыми почвами [Состав, свойства..., 2016].

Белоярская АЭС находится в г. Заречный, в 45 км к востоку от г. Екатеринбург. В эксплуатацию пущена в 1964 г. За время ее существования в эксплуатации были четыре энергоблока. Первые два блока (с водографитовыми канальными реакторами АМБ-100 и АМБ-200) были задействованы в периоды 1964–1981 и 1967–1989 гг. Реакторы остановлены по причине выработки ресурсов и находятся в режиме длительной консервации с выгруженным из реактора топливом. В настоящее время на станции работают два энергоблока: 3-й энергоблок с реактором на быстрых нейтронах БН-600 мощностью 600 МВт (пущен в эксплуатацию 8 апреля 1980 г.) и 4-й блок с реактором БН-800 мощностью 864 МВт (введен в эксплуатацию 27 июня 2014 г.). В перспективе рассматривается строительство 5-го энергоблока* с реактором БН-1200 мощностью 1220 МВт.

Для создания научной базы при оценке воздействия работающей АЭС на экосистемы прилегающей к ней территории было необходимо проведение длительных мониторинговых работ по изучению изменения параметров природных экосистем в течение всех периодов работы АЭС, что позволит разумно использовать результаты экологического мониторинга для поддержания их в состоянии экологической безопасности для природы и человека [Чеботина и др., 2005; Миграция радионуклидов..., 2007; Влияние АЭС..., 2008; Концептуальная модель..., 2020]. Это в первую очередь относится к тритию, концентрация которого в водной среде весьма динамична при сбросе в открытые, особенно в проточные, водоёмы и быстро меняется во времени и пространстве.

Представленные ниже результаты мониторинга трития получены в 1980–2015 гг. и включают периоды индивидуальной и совместной работы 1-го, 2-го и 3-го энергоблоков. Объектами наблюдений служили Белоярское водохранилище (водоём-охладитель станции), Ольховская болотно-речная экосистема, реки Ольховка и Пышма, воздушная среда, дождевые и снеговые выпадения, источники питьевого водоснабжения (колодцы, скважины, родники), моча людей. Основная часть исследований проводилась в пределах санитарно-защитной зоны и зоны наблюдения, однако в ряде случаев работы выполнялись на более удалённой территории.

2.2. Белоярское водохранилище

В процессе строительства БАЭС для охлаждения реакторов и технического водоснабжения станции в русле реки Пышма, в 75 км от истока, в 1959–1963 гг. был создан искусственный водоём — Белоярское водохранилище. В зону

* Белоярская АЭС готова начать строительство энергоблока № 5 в 2030 году // ИА ТАСС. 2020. 29 сентября. URL: <https://tass.ru/ural-news/9577155>.

затопления попала часть территории Белоярского района, покрытая в основном смешанными березово-сосновыми лесами. Помимо этого, были затоплены пахотные и луговые угодья Белоярского и Березовского районов. На основной площади водоёма также затоплены кустарники, пни, срубленные деревья. Протяжённость водоёма — около 20 км, ширина на уровне Белоярской атомной электростанции — около 3 км. Глубина по фарватеру реки Пышма достигает 15–20 м, средняя глубина — 8–9 м. Площадь зеркала водоёма составляет примерно 47 км² [Бескrestнов и др., 1978], берега преимущественно пологие, местами каменистые, большей частью заняты лесом, кое-где встречаются кустарниковые болота и пастбищно-луговые угодья. В водоём впадают речки Пушкариха, Черемшанка, Черная, Марья, Липовка и др.

Водные растения чаще встречаются в заливах, в центральной части они практически отсутствуют. Среди 29 зарегистрированных видов макрофитов преобладают рдесты (*Potamogeton pectinatus*, *P. compressus*), кладофора (*Cladophora glomerata*, *C. fracta*), элодея канадская (*Eloдея canadensis*), роголистник погруженный (*Ceratophyllum demersum*) и некоторые другие виды. Ихтиофауна водоёма представлена в основном плотвой, лещем, щукой, зеркальным карпом, реже встречаются линь, карась, окунь, судак. Среди фитопланктонных организмов по числу видов преобладают зелёные водоросли (хлорококковые, десмидиевые, вольвоксовые), менее распространены диатомовые, синезелёные, эвгленовые, пиррифитовые и другие отделы водорослей. В составе зоопланктона основную массу составляют ракообразные (веслоногие и ветвистоусые рачки), в меньшей численности встречаются коловратки [Чеботина и др., 2002]. Преобладающим типом донных отложений в водоёме является илистый сапропель, кроме него встречаются затопленная почва, песчано-илистый и песчаный грунты. По гидрохимическому составу водоём можно характеризовать как гидрокарбонатно-кальциевый со средней степенью минерализации и нормальным кислородным режимом [Ярушина и др., 2002].

Белоярская атомная электростанция расположена на левом берегу водохранилища, в 7 км к северу от плотины. Поступление радиоактивных веществ, в том числе трития, от АЭС во внешнюю среду возможно воздушным (через вентиляционные трубы, в виде принудительного выхлопа пара из барбаторов) и водным путём. Коммуникации жидких стоков от 1-го, 2-го и 3-го энергоблоков расположены следующим образом. Дебалансные промышленные воды направлены в Ольховское болото, которое находится в 5 км к юго-востоку от АЭС. Частичный сброс слаборадиоактивных жидких стоков в водоём-охладитель осуществляется через промливневый канал (ПЛК). На расстоянии примерно 0,5 км от него, ниже по течению, расположен водозаборный канал, через который производится забор воды из водоёма для систем охлаждения АЭС.

Ещё ниже (~ 2–2,5 км) находится водосбросной (теплый) канал, с его помощью вода после прохождения через системы охлаждения сбрасывается в водоём. В зоне подогрева (Тёплый залив) температура воды летом в среднем на 6–7 °С выше, чем за её пределами.

В полукилометре от БАЭС, в сторону верховья водохранилища, находится обводной канал общей протяжённостью около 1,5–2 км. Он берёт своё начало около водоочистных сооружений, далее в него сливаются воды из котельной БАЭС. Канал впадает в залив водоёма-охладителя за Биофизической станцией.

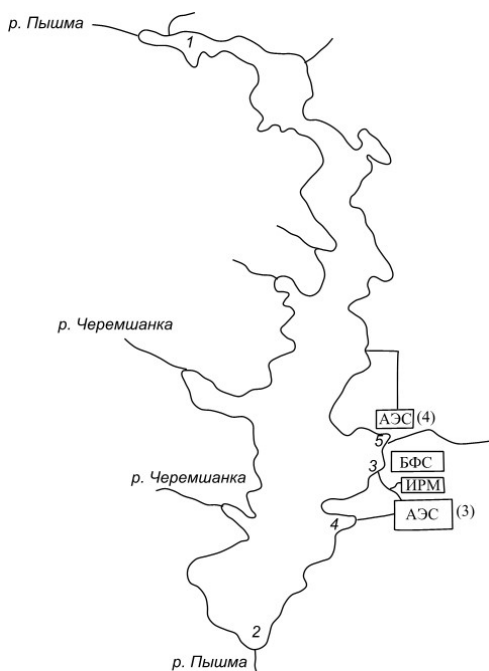


Рис. 2.30. Схема Белоярского водохранилища и расположение на нём постоянных точек наблюдений: АЭС (3) и (4) — 3-й и 4-й энергоблоки Белоярской АЭС; ИРМ — Институт реакторных материалов; БФС — Биофизическая станция Института экологии растений и животных УрО РАН; 1–5 — постоянные точки наблюдений

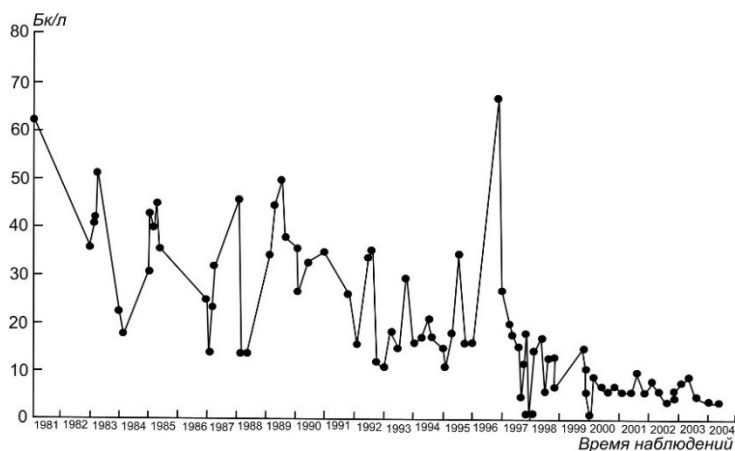
Для контроля поступления трития от АЭС на акватории Белоярского водохранилища были выбраны постоянные точки наблюдения (ПТН), в которых производился систематический отбор проб воды для определения содержания в ней радионуклида: 1 — верховье водоёма; 2 — район плотины; 3 — промливневый канал станции; 4 — Тёплый залив; 5 — район Биофизической станции (рис. 2.30).

Верховье водоёма (ПТН-1) находится за пределами наблюдаемой зоны АЭС вверх по течению, на расстоянии примерно 15 км от атомной станции. В связи с этим первоначально полагалось, что слаборadioактивные стоки, которые содержат тритий, непосредственно не могут попадать в верхнюю часть водоёма, поэтому первоначально эта точка была выбрана в качестве контрольной. Однако, как видно из результатов (рис. 2.31, а), концентрация трития в этом районе, особенно в первый период наблюдений, достигала 60 Бк/л.

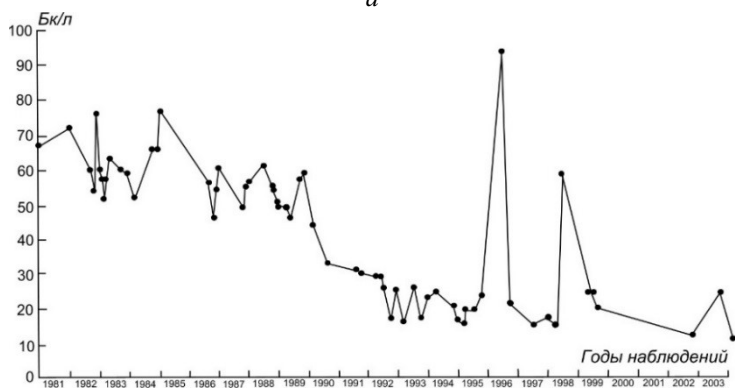
Напомним, что уровень техногенного фона по тритию составляет примерно 5 Бк/л. Таким образом, за время наблюдений большая часть проб воды верховья Белоярского водохранилища значительно превышала этот показатель. На фоне общей нестабильности концентраций трития во времени, в отдельные периоды фиксировалось заметное повышение содержания радионуклида в воде по сравнению со средними показателями. В частности, наиболее явное превышение (~ 70 Бк/л) было зарегистрировано в феврале 1996 г.

Анализ результатов всех наблюдений с 1980 по 2005 гг. в совокупности позволил выявить общую тенденцию к снижению содержания радионуклида в воде верховья водоёма от 40–60 Бк/л в 1980–1982 гг. до 6–10 Бк/л в 1999–2003 гг. В период до 1989 г. средняя концентрация нуклида оказалась примерно в 2 раза выше, чем в последующий период (соответственно 34 и 16 Бк/л). Эти различия статистически достоверны при высоком уровне значимости ($p < 0,01$). Разница в уровнях концентраций трития обусловлена тем, что в более ранний период (1980–1981 гг.) работали 1-й и 2-й энергоблоки, а в последующем (до 1989 г.) — 2-й и 3-й энергоблоки. В конце 1989 г. 2-й блок был снят с эксплуатации, следствием чего явилось заметное снижение концентрации

третия в воде исследуемого региона. К концу указанного периода наблюдений концентрация трития в верховье Белоярского водохранилища практически приближалась к уровню техногенного фона.



a



б

Рис. 2.31. Динамика концентраций трития в верховье Белоярского водохранилища (*a*), и в воде Белоярского водохранилища в районе плотины (*б*)

Район плотины (ПТН-2). На рис. 2.31, *б*, показана динамика концентраций трития в районе плотины, где вода из Белоярского водохранилища вытекает в реку Пышма. В целом, если исключить пиковые выбросы радионуклида в 1996 и 1998 гг., можно проследить тенденцию снижения концентраций радионуклида во времени. Повышенная концентрация трития в воде отмечалась в период совместной работы 1-го и 2-го блоков АЭС (60–75 Бк/л) и в последующие годы после снятия с эксплуатации 1-го энергоблока. После остановки 2-го энергоблока снижение содержания трития стало более заметно, однако на этом фоне фиксировались пиковые выбросы (февраль 1996 г. — 93 Бк/л, февраль 1998 г. — 60 Бк/л), связанные, возможно, с технологическими особенностями работы станции. Средний показатель, характеризующий содержание трития в воде исследуемого района в период с 1980 по 1989 гг. при совместной работе блоков (58 Бк/л), был достоверно выше, чем в последующие годы, когда работал только 3-й энергоблок (22 Бк/л).

Сравнение характеризующих содержание трития данных в верховье и в районе плотины водоёма позволяет выявить вклад атомной станции в загрязнение водной среды. В период с 1980 по 1989 гг. средняя концентрация трития в районе плотины была достоверно выше (при уровне значимости $< 0,01$), чем в верховье (соответственно 58 и 34 Бк/л). После вывода из эксплуатации 2-го энергоблока на фоне общего снижения содержания изотопа в воде обоих обследованных регионов достоверное различие между ними сохранилось.

Промливневый канал (ПТН-3). В промливневый канал поступают стоки с территории атомной станции и соседнего Института реакторных материалов (ИРМ) (рис. 2.32, а). Пробы отбирали из общего канала, соединяющего стоки обоих предприятий, однако в отдельных случаях их анализировали отдельно. Приведенные данные указывают на резкие колебания концентрации радионуклида в воде этого канала.

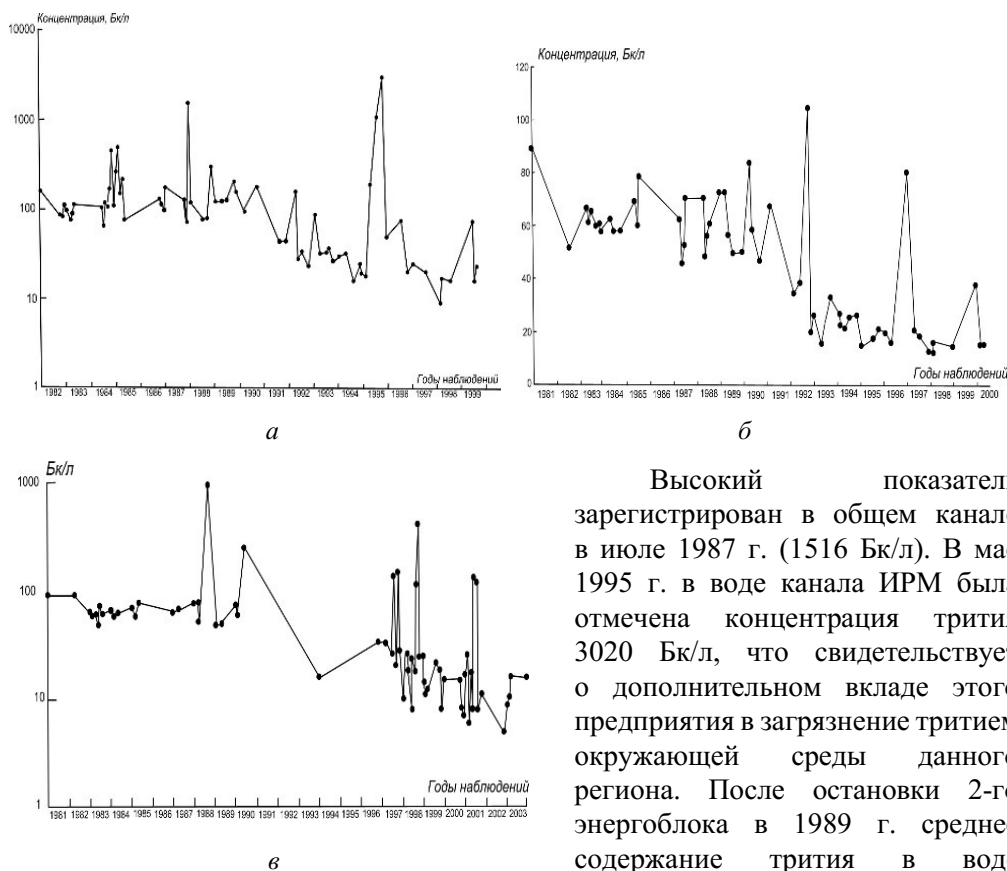


Рис. 2.32. Динамика концентраций трития в воде промливневого канала (а), в районе сброса подогретой воды (б), в районе Биофизической станции (в)

Высокий показатель зарегистрирован в общем канале в июле 1987 г. (1516 Бк/л). В мае 1995 г. в воде канала ИРМ отмечена концентрация трития 3020 Бк/л, что свидетельствует о дополнительном вкладе этого предприятия в загрязнение тритием окружающей среды данного региона. После остановки 2-го энергоблока в 1989 г. среднее содержание трития в воде промливневого канала заметно снизилось, однако диапазон колебаний предельных значений при этом даже увеличился.

Теплый канал (ПТН-4). Через этот канал в Тёплый залив сбрасывается подогретая вода, прошедшая через системы охлаждения АЭС. Залив изолирован от водоёма дамбой, так что непосредственно из водоёма вода в него не поступает. Концентрация трития

в теплом канале в разное время исследований варьировала от 13 до 105 Бк/л (см. рис. 2.32, б). Период совместной работы энергоблоков (1980–1989 гг.) характеризовался повышенным содержанием трития в воде (в среднем 65 Бк/л) по сравнению с последующим периодом, когда работал только 3-й энергоблок. В это время концентрация трития в зоне сброса подогретой воды снизилась в среднем в 3 раза (до 22 Бк/л). Ноябрь 1991 г. и февраль 1996 г. были отмечены пиковыми концентрациями радионуклида в воде, что, возможно, обусловлено поступлением радионуклида в системы охлаждения через водозаборный канал с вышерасположенной части водоёма.

Район Биофизической станции (ПТН-5). В небольшой залив, расположенный в районе Биофизической станции Института экологии растений и животных УрО РАН, выходит обводной канал, который дренирует территорию вокруг АЭС. Ответвление канала проходит вдоль водоочистных сооружений мимо котельной, расположенной недалеко от 3-го энергоблока АЭС. Результаты (см. рис. 2.32, в) указывают на резкие перепады концентраций трития в воде залива. Так, в январе 1988 г. и октябре 1989 г., в декабре и феврале 1998–1999 гг. зафиксированы пиковые выбросы радионуклида, приведшие к повышению концентраций радионуклида в воде залива до 140–1000 Бк/л. Если не принимать во внимание эти повышенные показатели, которые можно рассматривать как следствие протечек трубопровода и другого оборудования, в целом можно отметить более высокие значения концентраций радионуклида в воде в период совместной работы 2-го и 3-го энергоблоков до 1989 г. по сравнению с последующим периодом, когда работал только 3-й энергоблок.

Для более детального исследования масштабов поступления трития в залив за Биофизической станцией через обводной канал с 1989 по 2001 гг. проводили мониторинг радионуклида в воде канала на разных расстояниях от залива. Отбор проб осуществляли случайным образом и не привязывали его к технологическим мероприятиям АЭС.

Несмотря на то, что во всех указанных точках наблюдений концентрация радионуклида в воде варьировала в широких пределах (от уровня техногенного фона до десятков тысяч беккерелей на литр), полученные результаты позволили выделить несколько периодов, различающихся по уровням содержания трития в воде канала. Период с 1988-го по сентябрь 1989 г. характеризовался наиболее высокими показателями, в это время работали 2-й и 3-й энергоблоки АЭС. В дальнейшем (с сентября 1989-го по 1995 гг.) наблюдалось заметное снижение концентраций трития в воде обводного канала, что можно объяснить остановкой 2-го энергоблока в сентябре 1989 г. Снижение концентраций радионуклида в воде канала наблюдалось и в последующий период, вплоть до 2001 г. (табл. 2.6). Кроме снятия с эксплуатации 2-го энергоблока снижению поступления трития в водоём через обводной канал в этот период способствовали технологические мероприятия, проводимые АЭС с целью снижения поступления трития в окружающую среду.

Результаты мониторинга трития на акватории Белоярского водохранилища с 1980 по 2003 гг. в целом показали, что в воде наблюдаемой зоны водоёма-охладителя, где размещались постоянные точки наблюдений 2, 3 и 4, содержание радионуклида в воде было достоверно выше, чем в верховье водоёма (ПТН-1), расположенного примерно в 15 км вверх по течению ($p < 0,001$), что говорит о дополнительном поступлении трития в водоём в процессе работы атомной станции.

Во все годы наблюдений концентрация радионуклида в воде Белоярского водохранилища не превышала допустимых уровней для питьевой воды, однако во всех случаях она была выше условно принятого нами уровня техногенного фона для Уральского региона (5 Бк/л).

Таблица 2.6

Средние концентрации трития в воде обводного канала
в различные периоды наблюдений, Бк/л

Место отбора проб	1988 г. — сентябрь 1989 г.	Сентябрь 1989 г. — 1995 г.	1996–1998 гг.	2000–2001 гг.
Водоочистные сооружения				
ниже	4150	1672	409	24
выше	5420	1493	Не определяли	22
Район котельной	2420	1398	197	218
Около дорог пересечения	1620	2972	Не определяли	282
Устье канала	1220	2615	218	162
Среднее	2970	2030	275	142

2.3. Ольховская болотно-речная экосистема

С момента пуска Белоярской АЭС Ольховская болотно-речная экосистема служила в качестве природного фильтра на пути слаборадиоактивных стоков атомной станции в реку Пышма. Это обстоятельство предполагало необходимость всестороннего изучения этой экосистемы, что необходимо для обеспечения защиты окружающей среды и населения близлежащих регионов от радиационных воздействий.

Исследуемая болотная экосистема, расположенная примерно в 5–7 км к юго-востоку от Белоярской АЭС, является отчуждённой территорией, входящей в санитарно-защитную зону. Она включает в себя сбросной канал, впадающий в Ольховское болото, само болото и небольшую речку Ольховку, вытекающую в реку Пышма. Через сбросной канал длиной около 200 м в болото производится контролируемый сброс технологических вод АЭС после прохождения через водоочистные сооружения (рис. 2.33). Грунт болота — преимущественно осоковый торф, максимальная глубина торфяной залежи примерно 2,5 м. Дно болота сложено синей глиной. В травяном ярусе чаще встречаются осоки дернистая, пузырчатая, вейник Лансдорфа, тростник, сабельник, менее обильны вербейник, лабазник, осока пузырчатая и др. В древостое преобладают берёза, ива серая, много сухостоя. Среди мохового покрова — сфагнум щетинистый, в микропонижениях — аулаконииум болотный и другие виды мха. К окраинам болота приурочен березняк осоковый с высотой древостоя 10–12 м. Площадь болота составляет приблизительно 47 га. Технологические стоки сформировали в болоте несколько русел, которые прослеживались в верхней и средней частях болота, а затем пропадали в болотной растительности, в его нижней части.

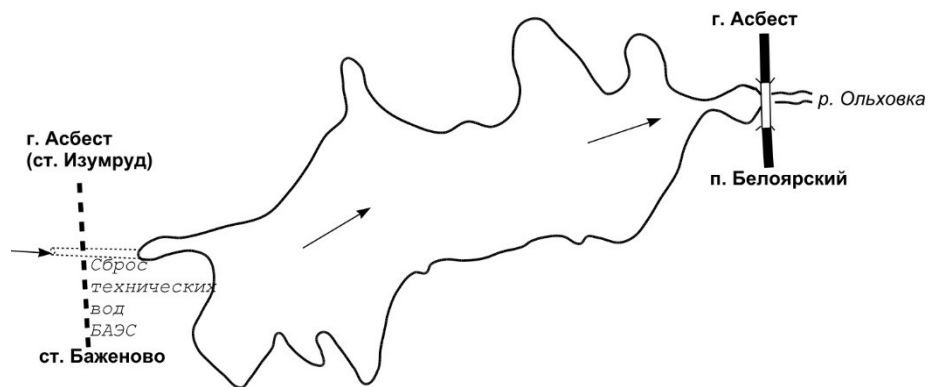


Рис. 2.33. Схематический план Ольховского болота

Первый этап исследований различных звеньев болотно-речной экосистемы характеризовался сравнительно высокими концентрациями трития по всей её протяжённости. В 1981–1982 гг. регистрировались следующие уровни содержания радионуклида в воде, Бк/л: сбросной канал — 44–29 710, начало болота — 370–19 830, средняя часть болота — 2150–8330. В истоке и устье вытекающей из болота речки Ольховки содержание трития варьировало от 1670 до 8210 Бк/л. Концентрации радионуклида изменялись в широких пределах в зависимости от времени отбора проб, что обусловлено периодичностью сбросов АЭС. В указанный период времени между верхним и нижним участками болота концентрация трития снижалась примерно в 2 раза (рис. 2.34).

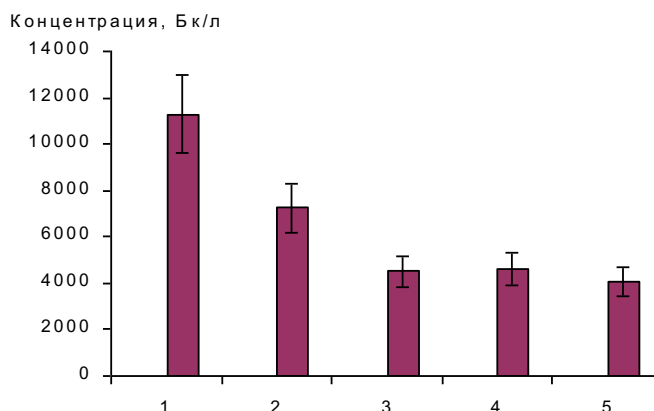


Рис. 2.34. Концентрация трития в воде Ольховской болотно-речной экосистемы в 1981–1982 гг.: 1 — сбросной канал; 2 — начало болота; 3 — средняя часть болота; 4, 5 — исток и устье реки Ольховки

Однако эти различия оказались статистически недостоверными ввиду большого разброса данных. Такое снижение объясняется тем, что при прохождении через болотно-речную экосистему сбросные воды разбавляются водой подземных источников [К проблеме нормирования..., 1988]. Это предположение подтверждено геофизическими исследованиями, которые показали, что болото располагается в тектонически нарушенной зоне, где имеется подпор глубинных вод

из тектонического разлома [Особенности радиационной..., 2000]. Разбавление сбросной воды происходит в основном на участке, расположенном в верхней части болота.

В табл. 2.7 приведены усреднённые по годам (1981 по 1990 гг.) результаты мониторинга трития в воде Ольховского болота.

Таблица 2.7

Усредненные концентрации трития в воде Ольховского болота в различные годы наблюдений

Год наблюдения	Число повторностей	Концентрация, Бк/л
1981	10	6450 ± 1820
1982	11	6150 ± 1200
1983	6	1010 ± 230
1984	4	480 ± 70
1985	5	3220 ± 2000
1986	12	2710 ± 270
1988	6	2710 ± 270
1989	8	3390 ± 1958
1990	46	1030 ± 156

Видно, что в исследуемый период концентрация радионуклида в воде болота удерживалась на сравнительно высоком уровне. Несмотря на вариабельность данных, можно отметить, что в период работы 2-го и 3-го энергоблоков содержание трития в воде было в среднем в 3 раза выше (3265 ± 794 Бк/л при $n = 62$), чем после остановки 2-го энергоблока, когда функционировал только 3-й (1030 ± 156 Бк/л при $n = 46$). Установленное различие достоверно при $p < 0,001$. Согласно расчётным данным, среднегодовое поступление радионуклида в Ольховское болото от АЭС с 1981 по 1989 гг. составило $(300-400) \cdot 10^{10}$ Бк/год, а в 1990 г. — $(110-130) \cdot 10^{10}$ Бк/год [Поступление трития..., 1994].

Для оценки возможности проникновения трития из сбросных вод в торфяную залежь Ольховского болота в 1983 и 1984 гг. с помощью торфобура в центральной части болота были отобраны пробы грунта до глубины 150 см, при этом были исследованы два вертикальных профиля: один располагался на транзитном потоке, а другой — на расстоянии примерно 10 м от него.

На рис. 2.35 представлены усреднённые данные содержания трития в связанной воде грунта (капиллярная и адсорбционная формы влаги) в зависимости от глубины отбора проб. Результаты обработаны методом скользящей средней. Видно, что в 1983 г. концентрация радионуклида в воде грунта была выше (1000–3000 Бк/л) по сравнению с 1984 г. (400–1400 Бк/л), что можно объяснить снижением концентрации радионуклида в сбросной воде в указанный период времени (см. табл. 2.7).

Приведённые данные свидетельствуют о том, что при длительном транзите загрязнённой тритием воды через торфяную залежь Ольховского болота часть радионуклида поглощается в профиле грунта и удерживается в нём. Тритий, связанный с грунтом, находится в состоянии динамического равновесия с водой, протекающей через болото.

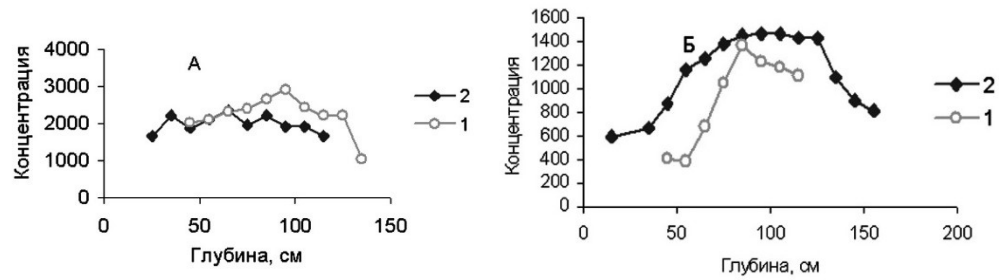


Рис. 2.35. Распределение трития по глубине торфяной залежи Ольховского болота, Бк/л: А — 1983 г., Б — 1984 г.; 1 — профиль на транзитном потоке; 2 — профиль на расстоянии 10 м от транзитного потока

С 1980 по 2000 гг. проводился систематический мониторинг трития в воде истока реки Ольховка, вытекающей из болота. Как видно из рис. 2.36, за период наблюдений концентрация радионуклида изменялась в широких пределах — от 10 до 10 000 Бк/л. Несмотря на вариабельность данных, прослеживалось снижение концентрации трития в воде во времени.

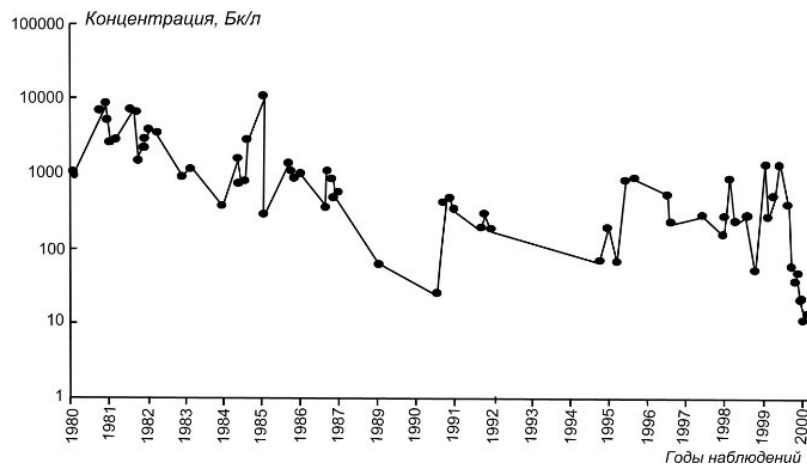


Рис. 2.36. Динамика концентраций трития в реке Ольховка на выходе из Ольховского болота

После вывода из эксплуатации в 1989 г. 2-го энергоблока содержание радионуклида снизилось примерно в 10 раз (до 250 ± 50 Бк/л при $n = 8$) по сравнению с предыдущим периодом (2600 ± 260 Бк/л при $n = 33$). Статистическая обработка результатов показала, что указанные различия высоко достоверны при уровне значимости $p < 0,01$.

Необходимо отметить, что при исследовании роли Ольховского болота как природного фильтра на пути слаборадиоактивных стоков БАЭС в Отделе континентальной радиэкологии ИЭРЖ работа проводилась и по другим долгоживущим радионуклидам, в том числе по ^{90}Sr и ^{137}Cs . В процессе всестороннего исследования радиационной ситуации в болотно-речной экосистеме было выявлено, что с момента пуска АЭС до 1989 г. в грунтах накопилось достаточно высокое количество радионуклидов, в том числе ^{90}Sr и ^{137}Cs ,

в результате чего сорбционная ёмкость болота значительно снизилась, а грунт болота в некоторых местах по суммарному количеству радионуклидов классифицировался как радиоактивные отходы [Распределение ^{90}Sr ..., 1982; Молчанова и др., 1985; Нифонтова и др., 1986; Маковский и др., 1991; Молчанова и др., 2009]. Для предотвращения вымывания радионуклидов в речную сеть атомной станцией были проведены работы по реконструкции сбросов, в результате чего дебалансные воды через специальный трубопровод были выведены в нижнюю часть болота. После реконструкции сбросов содержание воды в болоте сократилось, обозначилось русло, впадающее в реку Ольховка.

Для оценки радиационной ситуации в Ольховском болоте после реконструкции сбросов в 2003 г. было проведено картирование болота по тритию. Координаты и местонахождение точек наблюдений устанавливали с помощью спутниковой навигационной системы GPS. Как видно из рис. 2.37, к этому времени на значительной части территории болота концентрация радионуклида снизилась. В некоторых местах периферийной зоны и внутренней территории болота концентрация трития лишь в несколько раз превышала уровень техногенного фона. Однако в некоторых местах, преимущественно в районах расположения старого и современного русел, тритий в ощутимых концентрациях ещё обнаруживался в воде — до 800–1300 Бк/л.

В целом, вывод из эксплуатации 1-го и 2-го энергоблоков АЭС, а также реконструкция сбросов в Ольховское болото заметно улучшили ситуацию по тритию в исследуемой болотно-речной экосистеме. Со временем снизился также уровень загрязнения радионуклидами ^{90}Sr и ^{137}Cs торфяной залежи и вынос их с водным потоком [Молчанова и др., 2009; Концептуальная модель..., 2020], что, несомненно, сказалось положительным образом на состоянии природной среды в прилегающем регионе.

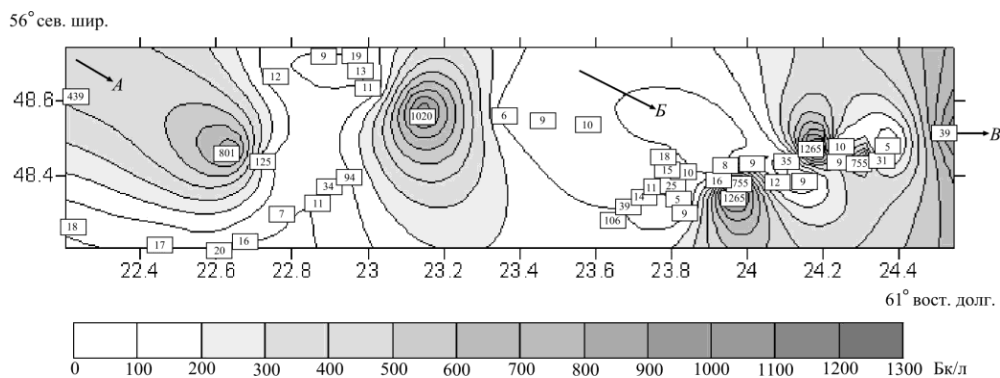


Рис. 2.37. Уровни концентраций трития в воде Ольховского болота в 2003 г., Бк/л:
A — сброс хозяйственно-фекальных стоков; *B* — сброс дебалансных вод;
V — сброс воды в реку Ольховку

2.4. Водная система реки Пышма

Река Пышма является важной водной артерией на территории Свердловской и Тюменской областей. Исток реки — оз. Ключевское, расположенное на массиве Молебского болота, вблизи г. Верхняя Пышма. Протяжённость реки — 626 км,

площадь водосбора — 19,4 тыс. км². Река пересекает с запада на восток обширную зауральскую лесостепь и впадает в реку Тура. Берега Пышмы в верхнем её течении покрыты лесом, в среднем — преимущественно скалистые, в нижнем — преобладает открытая местность. Река сильно петляет, встречаются старицы. Скорость течения в межень составляет 0,5–0,7 м/с. Ширина реки в верховье — 8–10 м, ближе к устью — 60–100 м [Ленченко и др., 1964].

Вода реки Пышма. Река принимает в себя стоки АЭС, выходящие из Белоярского водохранилища, а далее вниз по течению — слаборадиоактивные стоки, вытекающие из Ольховского болота через реку Ольховку. В 1981–1984 гг. исследовали уровни концентраций трития в реке Пышма выше (~ 500 м) и ниже (~ 500 м) места впадения Ольховки (табл. 2.8). Видно, что стоки последней увеличивали поступление трития в расположенную ниже по течению часть Пышмы. При этом наиболее загрязнённой оказалась вода в период работы 1-го и 2-го энергоблоков. После остановки 1-го блока (1981 г.) уровень содержания трития в указанных точках наблюдения на реке Пышма стал снижаться.

Таблица 2.8

Усреднённые концентрации трития в воде реки Пышма
выше и ниже места впадения реки Ольховка, Бк/л

1981 г.	1982 г.	1983 г.	1984 г.
Выше места впадения реки Ольховка			
$33 \pm 18 (n = 5)$	$46 \pm 4 (n = 3)$	$44 \pm 3 (n = 4)$	$45 \pm 3 (n = 3)$
Ниже места впадения реки Ольховка			
$621 \pm 320 (n = 5)$	$148 \pm 18 (n = 3)$	$90 \pm 8 (n = 4)$	$55 \pm 2 (n = 3)$

С 1983 по 2001 гг. исследовали содержание трития в воде реки Пышма на расстоянии до 120 км от места впадения реки Ольховка (табл. 2.9). Мониторинг на участке от Кумовской мельницы до г. Камышлова показал, что в 1983–1984 гг. содержание радионуклида в воде было наиболее высоким (в среднем 56–60 Бк/л) и имело тенденцию к снижению вниз по течению реки Пышма за счёт разбавления её водами. Концентрация трития в воде в это время в среднем примерно в 10 и более раз превышала уровень техногенного фона для Уральского региона. После вывода из эксплуатации 2-го энергоблока в 1989 г. средняя концентрация радионуклида в воде реки Пышма стала снижаться. Так, на участке Кумовская мельница — Химлесхоз в 1983–1984 гг. она составила в среднем 71 ± 6 Бк/л, а с 1991 по 2001 гг. уменьшилась в среднем до 20 ± 1 Бк/л [Чеботина и др., 1990; Чеботина, Николин, 2005].

Следует заметить, что в отдельные периоды наблюдений регистрировались повышенные сбросы трития в реку Пышма: так, 15–20 июня 2002 г. в воде определялись следующие концентрации радионуклида, Бк/л: п. Белокаменный — 22, Пылаево — 430, Успенка — 13, Винзили — 1500, Муллаши — 62. Повышенная концентрация трития в районе пос. Мезенское (170 Бк/л), расположенного недалеко от плотины Белоярского водохранилища, указывает на то, что радионуклид поступил в реку из Белоярского водохранилища. Очевидно, подобная ситуация в реке Пышма носит эпизодический характер, однако она свидетельствует о том, что сбросы должны находиться под постоянным наблюдением.

Таблица 2.9

Концентрации трития в воде реки Пышма на разном расстоянии от устья реки Ольховка, Бк/л

Пункт наблюдений (расстояние от устья реки Ольховка, км)	Август 1983 г.	Сентябрь 1983 г.	Август 1984 г.	Июль- август 1990 г.	Май 1991 г.	Июнь 1991 г.	Июль 1991 г.	Июль 1999 г.	Июль 2000 г.	Август- январь 2001 г.
Кумовская мельница (0,5)	72	109	55	43 ± 10	–	–	–	17; 24	–	–
Малиновка (13)	62	103	37	40 ± 5	30	44	30	10; 13	10	12
Петушки (18)	61	101	28	43 ± 6	22	27	28	11; 20		14
Белокаменный (26)	56	97	85	42 ± 5	23	22	27	11; 12	22	
Химлесхоз (33)	55	–	–	42 ± 5	23	23	27	14; 12	–	–
Глядены (44)	49	93	101	–	–	–	–	–	–	–
Знаменский (56)	48	63	51	–	–	–	–	–	–	–
Курьи (71)	44	56	41	–	–	–	–	–	–	–
Филатовское (86)	–	–	38	–	–	–	–	–	–	–
Камышлов (120)	–	–	37	–	–	–	–	–	–	–
Среднее	56 ± 4	89 ± 8	59 ± 9	42 ± 1	24 ± 2	29 ± 6	28 ± 1	14 ± 1	16 ± 10	13 ± 2

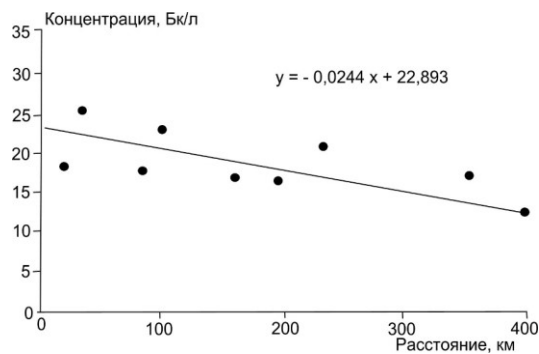


Рис. 2.38. Концентрация трития в воде реки Пышма на разном расстоянии от плотины водоёма-охладителя

в следующих пунктах наблюдений (в скобках приведено расстояние данного пункта до плотины Белоярского водохранилища, км): Боярка (1,4), Курманка (3,0), Гагарка (3,8), Белоярский (7,7), Крутиха (10,6), Ялунино (17,5), Малиновка (32,7), Белокаменный (45,7), Светлое (60,8), Знаменское (76,6), Сухой Лог (82,8), Новопышминское (99), Камышлов (145), Пышма (195), Никольское (160), Талица (232), Винзили (400). Как видно из рис. 2.38, на момент исследования содержание радионуклида в речной воде варьировало от 13 до 26 Бк/л при среднем значении 20 ± 2 Бк/л. При этом все уровни концентраций трития от 3 до 5 раз превышали уровень техногенного фона по тритию для Уральского региона [Чеботина, Николин, 2005]. Содержание трития в воде реки Пышма достоверно снижалось по мере удаления от плотины (коэффициент корреляции (КК) составил $-0,71$; $p = 0,033$).

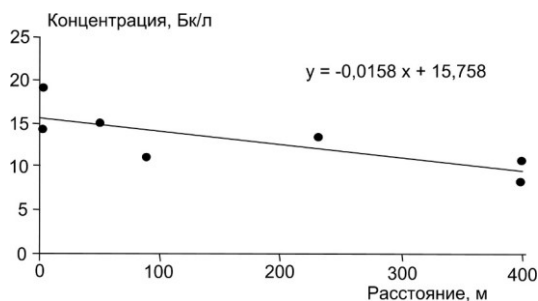


Рис. 2.39. Средние концентрации трития в воде колодцев населенных пунктов в прибрежной зоне р. Пышмы на разном расстоянии от плотины Белоярского водохранилища

Анализ данных показал, что концентрация трития достоверно снижалась с увеличением их глубины ($КК = 0,67$; $p = 0,065$) (рис. 2.40). На всём протяжении реки это снижение было в пределах 2 раз.

В 2013 г. были исследованы уровни концентрации трития в воде реки Пышма в районах населённых пунктов, которые расположены на протяжении реки от плотины Белоярского водохранилища до пос. Винзили. Кроме того, исследовали проникновение тритиевого загрязнения в различные типы питьевых вод в населённых пунктах, расположенных в пойме реки (колодцы, скважины, родники, сетевая вода колонок). Отбор проб воды производили

Колодцы. Согласно проведённым исследованиям, содержание радионуклида в воде колодцев, расположенных в пойменной зоне реки Пышма, варьировало в период исследований от 8 до 19 Бк/л при среднем значении 13 ± 1 Бк/л. Концентрация радионуклида достоверно снижалась с увеличением расстояния населённых пунктов до плотины Белоярского водохранилища ($КК = -0,80$; $p = 0,033$) (рис. 2.39). Глубина колодцев варьировала от 2 до 8 м.

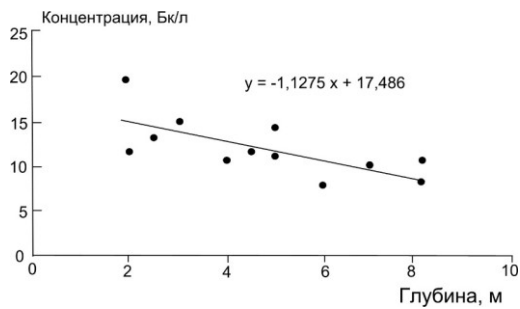


Рис. 2.40. Зависимость концентраций трития в воде колодцев в населённых пунктах по реке Пышма от глубины источника

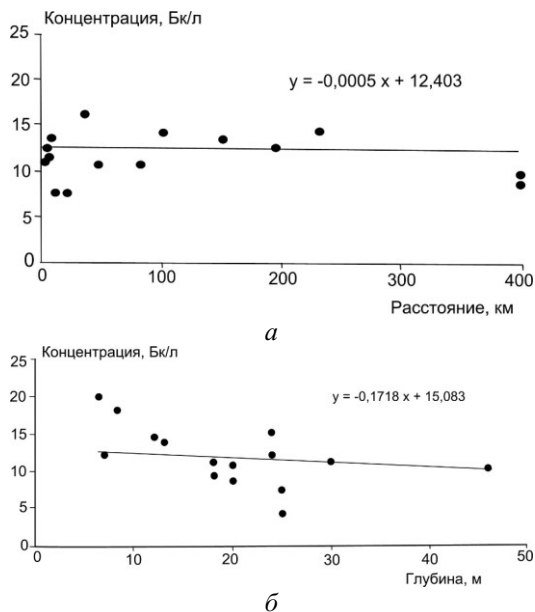


Рис. 2.41. Уровни концентрации трития в воде личных скважин в населённых пунктах поймы реки Пышма: а — на разном расстоянии от плотины Белоярского водохранилища; б — в зависимости от глубины источника

Личные скважины.

Исследованные личные скважины в пойме реки Пышма имели глубину от 5 до 47 м. Как видно из рис. 2.41, а, содержание радионуклида в скважинной воде изменялось от 7 до 16 Бк/л при среднем значении 12 ± 1 Бк/л.

В целом на всём протяжении реки содержание трития в воде скважин не зависело от расстояния ($p > 0,05$), хотя в непосредственной близости от Белоярского водохранилища, на расстоянии 3–5 км от плотины, в них наблюдались заметные колебания концентраций данного радионуклида. Это можно объяснить разнообразием типов грунтов в данном районе: наряду с илистыми и песчано-илистыми грунтами здесь встречается скальный грунт, препятствующий проникновению воды из водоёма-охладителя в водоносные горизонты.

Анализ концентраций трития в воде личных скважин в зависимости от их глубины (рис. 2.41, б) также не выявил существенных различий между ними, что подтверждается результатами статистической обработки ($p > 0,05$).

Сетевая вода. В табл. 2.10 представлены уровни концентраций радионуклида в сетевой воде, поступающей в водопроводные

колонки некоторых населённых пунктов, расположенных в прибрежной зоне реки Пышма.

В колонки подается вода из специально пробуренных глубинных скважин. К сожалению, глубину таких скважин удалось установить только для двух населённых пунктов. Оказалось, что для большинства посёлков уровни концентрации трития в сетевой воде имеют близкие значения (12–18 Бк/л) и практически не зависят от расстояния населённого пункта до водоёма-охладителя.

Только для двух пунктов наблюдений (Знаменский и Сухой Лог) отмечены пониженные концентрации трития в сетевой воде, которые приближаются

к уровню техногенного фона. Указанные пункты сравнительно близко расположены друг от друга (~ 5–6 км). Можно предполагать, что они обеспечиваются водой из одного источника, имеющего меньшую концентрацию трития.

Таблица 2.10

Содержание трития в сетевой воде населенных пунктов, расположенных в пойме реки Пышма

Населённый пункт	Глубина скважины, м	Концентрация, Бк/л
Курманка	Не известна	12
Гагарка	«	14
Белоярский	«	16
Белокаменный	70	12
Знаменский	Не известна	5
Сухой Лог	«	8
Новопышминский	«	18
Никольское	«	15
Пышма	«	17
Талица	~ 80	15
Среднее		13 ± 1

Родниковая вода. Уровни концентрации трития в родниковой воде семи населённых пунктов, расположенных в пойме реки Пышма на разном расстоянии от Белоярской АЭС, имеют близкие значения и не зависят от расстояния. В среднем они почти в 2 раза превышают соответствующие концентрации радионуклида в сетевой воде.

Средние концентрации трития в родниковой воде населённых пунктов, расположенных в пойме реки Пышма

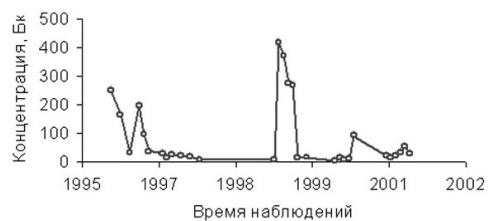
Курманка	23 Бк/л
Гагарка	20 Бк/л
Крутиха	22 и 17 Бк/л
Ялунино	26 Бк/л
Белокаменный	24 Бк/л
Сухой Лог	34 Бк/л
Новопышминский	14 Бк/л
Среднее	22 ± 3 Бк/л

Таким образом, результаты исследований водной системы реки Пышма в 2013 г. позволили выявить повышенные уровни концентрации радионуклида на всём протяжении реки, от 3 до 5 раз превышающие уровень техногенного фона. В пойме реки надфоновое тритиевое загрязнение проникает в источники питьевого водоснабжения — колодцы и скважины. Снижение концентраций трития в воде колодцев и в воде Пышмы с увеличением расстояния до плотины Белоярского водохранилища свидетельствует о том, что тритиевое загрязнение поступает

в них преимущественно из реки Пышма. В то же время практически постоянная концентрация радионуклида в скважинных водах на всем протяжении реки говорит о том, что водоносный горизонт, питающий эти скважины, не связан с водой реки Пышма. Однако тот факт, что концентрация трития в этом водоносном горизонте в 2–3 раза превышает уровень техногенного фона, заставляет предположить, что возможным источником их загрязнения служат водоносные горизонты, расположенные под энергоблоками на территории БАЭС. Повышенные концентрации трития в родниковой воде (по сравнению с глубинными водами), очевидно, обусловлены её загрязнением за счёт поступления трития от воздушных выбросов и поверхностных вод, имеющих более высокую концентрацию радионуклида.

2.5. Воздушная среда

Для оценки возможности поступления трития от АЭС с воздушными выбросами на крыше Биофизической станции размещали открытые стеклянные сосуды с дистиллированной водой. При этом предполагали, что дистиллированная вода может служить поглотителем трития, поступающего в воздух с выбросами станции. Аналогичные сосуды размещали в помещении Биофизической станции. Экспозицию в течение суток проводили в разное время года при сухой безветренной погоде на протяжении ряда лет. Сосуды помещали на экспозицию во времени случайным образом, затем определяли уровни концентраций радионуклида в воде экспериментальных сосудов описанным выше способом.



а



б

Рис. 2.42. Изменение концентраций трития в воде экспериментальных сосудов, размещенных на крыше (а) и в здании (б) Биофизической станции

дистиллированной воды в помещении Биофизической станции, куда радионуклид может поступать из окружающего воздушного пространства через окна и двери (рис. 2.42, б).

Содержание трития в дистиллированной воде, которая использовалась в опыте в качестве поглощающей радионуклид среды, в разное время проведения эксперимента варьировало от 5 до 28 Бк/л при среднем значении $9,7 \pm 1,2$ Бк/л.

На рис. 2.42, а, показано, как изменяется концентрация трития в экспериментальных сосудах, специально размещенных на крыше Биофизической станции, в разные годы наблюдений. Оказалось, что в более 80 % временных точек содержание трития превышало уровень, установленный для дистиллированной воды до начала экспозиции, а в ряде случаев такое превышение достигало 10–40 раз. Аналогичная картина выявлена при экспозиции

Анализ приведенных на рис. 2.42 данных позволил заключить, что тритий поступает в воздушное пространство неравномерно, о чем свидетельствуют периоды повышенных концентраций радионуклида в экспериментальных сосудах на фоне более низких значений. Это может быть связано как с периодичностью выбросов АЭС, так и направлением преобладающих ветров, относящих радиоактивное облако от места исследования.

Пространство внутри здания Биофизической станции дольше очищается от поступившего радионуклида, чем открытое воздушное пространство на крыше станции. Об этом свидетельствуют более высокие показатели концентраций трития в экспозиционной воде помещений по сравнению с аналогичным вариантом на крыше здания.

Таким образом, приведенные экспериментальные данные подтвердили тот факт, что, наряду с жидкими стоками, тритий поступает от АЭС в окружающую среду с воздушными выбросами. На примере Биофизической станции показано, что из-за большой подвижности трития в воздушной среде он может проникать внутрь зданий и создавать в них повышенный тритиевый фон.

2.6. Дождевые и снеговые осадки

Дождевые и снеговые осадки, проходя через воздушное пространство, поглощают содержащийся там тритий, тем самым очищая атмосферный воздух.

Исследования в районе АЭС выполняли в различные периоды работы станции. Сбор дождевых осадков производили в наблюдаемой зоне АЭС и на контрольных территориях, в качестве которых служили район Рефтинской ГРЭС (60 км на северо-восток от АЭС) и Ботанического сада Института экологии растений и животных УрО РАН (45 км на северо-запад от АЭС). Согласно полученным в 1983–1984 гг. результатам, существенных различий по концентрациям трития в дождевых осадках различных пунктов наблюдений не выявлено. Содержание радионуклида в период совместной работы 2-го и 3-го энергоблоков АЭС варьировало от 14 до 32 Бк/л при средних значениях 20 ± 1 и 23 ± 1 Бк/л в 1983 и 1984 гг. соответственно (табл. 2.11). Средние концентрации радионуклида в дождевых осадках наблюдаемой зона АЭС не отличались от показателей, полученных для контрольных районов.

В 1997 г. после вывода из эксплуатации 2-го энергоблока содержание трития в дождевых осадках в районе Биофизической станции составляло, Бк/л: май — 18, июнь — 22, июль — 41, август — 14, сентябрь — 9,5. Среднее значение за этот период (21 ± 6 Бк/л) не отличалось от соответствующего показателя для этого района в 1983–1984 гг. (23 ± 1 Бк/л). Двукратное измерение концентраций трития в дождевых осадках в 2002 г. выявило довольно низкие значения на уровне техногенного фона для Уральского региона, в 2003 г. они были заметно выше (май — 31 Бк/л; июль — 29 Бк/л; сентябрь — 228 Бк/л).

При исследовании содержания трития в снежном покрове снег на всю глубину отбирали в конце зимы. В период 1981–1985 гг. в качестве контрольных районов были выбраны посёлки Рефтинский, В. Дуброво и Ботанический сад УрО РАН в Екатеринбурге. Как видно из табл. 2.12, повышенное содержание в снеговой воде зарегистрировано на промплощадке БАЭС (76–118 Бк/л); небольшое превышение среднего показателя отмечено также в районе Биофизической станции, расположенной в непосредственной близости от АЭС

(29–41 Бк/л). В остальных пунктах наблюдений средние значения варьировали от 12 до 33 Бк/л и были близки к таковым на контрольных участках.

Таблица 2.11

Концентрации трития в дождевой воде в наблюдаемой зоне Белоярской АЭС и на контрольных пунктах наблюдений в 1983–1984 гг., Бк/л

Место отбора проб	Июнь 1983 г.	Июль 1983 г.	Август 1983 г.	Среднее за 1983 г.
Каменка	20	20	14	18 ± 3
Режик	27	20	15	21 ± 5
Муранитный	17	20	16	18 ± 2
Мезенка	–	–	–	–
Заречный	20	25	16	20 ± 4
Биостанция	30	25	20	25 ± 4
Промплощадка БАЭС	–	–	–	–
пос. Рефтинский	23	22	16	20 ± 3
Ботанический сад	18	22	18	19 ± 2
Место отбора проб	Июнь 1984 г.	Июль 1984 г.	Август 1984 г.	Среднее за 1984 г.
Каменка	–	23	17	19 ± 0,2
Режик	–	30; 27	23	24 ± 2
Муранитный	27	27	22	21 ± 2
Мезенка	–	28; 27	27	27 ± 0,4
Заречный	32	–	–	23 ± 4
Биостанция	20	32; 28	23; 23	25 ± 1
Промплощадка БАЭС	–	30; 31	23; 22	26 ± 2
пос. Рефтинский	26	28	22	23 ± 2
Ботанический сад		24	20	20 ± 1

Таблица 2.12

Уровни концентраций трития в снеговой воде в марте 1981–1985 гг., Бк/л

Место наблюдений	1981 г.	1982 г.	1985 г.
Каменка	33 ± 1	12 ± 0,5	18
Режик	30 ± 1	21 ± 0,5	23
Муранитный	33 ± 1,6	18 ± 0,4	17
Мезенка	22 ± 0,6	20 ± 1	23
Заречный	33 ± 1,5	29 ± 1	20
Биостанция	41 ± 2	38 ± 1	29
Промплощадка АЭС	118 ± 6	76 ± 4	100
пос. Рефтинский	33 ± 2	28	15
г. Екатеринбург, Ботанический сад	–	12	27
пос. В. Дуброво	33 ± 2	16 ± 1	–

Прилегающий к БАЭС район был обследован в 1986 г. более детально. Для этой цели отбирали пробы снега на расстоянии приблизительно 1 км в разных направлениях от АЭС, а также в районе Биофизической станции. Приведённые в табл. 2.13 данные подтвердили факт наличия повышенных концентраций радионуклида в снеговой воде вокруг атомной станции, при этом наиболее высокие показатели оказались в районе Биофизической станции.

Таблица 2.13

Концентрации трития в снеговой воде в январе-марте 1986 г.

Место отбора проб	Концентрация трития, Бк/л
Территория БАЭС	51 ± 1
1 км к северу от БАЭС	41 ± 1
1 км к востоку от БАЭС	45 ± 3
1 км к югу от БАЭС	40 ± 3
1 км к западу от БАЭС	53 ± 5
Биостанция за зданием	69 ± 4
Биостанция, перед зданием	136 ± 2
Биостанция, крыша здания	172; 41
Екатеринбург, Ботанический сад	9 ± 0,1

После вывода из эксплуатации 2-го энергоблока проводился мониторинг трития в снежном покрове наблюдаемой зоны АЭС, включающий 25 точек наблюдения. Исследования 1997–2003 гг. показали, что в этот период выявлены эпизодические повышенные концентрации радионуклида преимущественно в местах, примыкающих к АЭС и ИРМ (табл. 2.14).

В частности, в 2002 г. содержание радионуклида в снежном покрове с северной стороны от ИРМ составляло 1090 Бк/л, в 2003 г. с западной стороны от БАЭС оно составляло 456 Бк/л. Полученные данные свидетельствуют о возможном вкладе в загрязнение снежного покрова тритием на прилегающей к АЭС территории за счёт работы экспериментального реактора ИРМ. Последнее подтверждается ранее полученными данными о поступлении радионуклида в водоём-охладитель через промливневый канал ИРМ: в 1995 г. в воде этого канала была зарегистрирована концентрация трития 3020 Бк/л.

Снежный покров на остальной части наблюдаемой зоны в указанный период характеризовался средними показателями от 15 до 33 Бк/л воды, которые в 3–7 раз превышали уровень техногенного фона для Уральского региона.

В 2010 г. в зону наблюдения были включены населённые пункты, расположенные на расстоянии более 20 км от АЭС. Из рис. 2.43 видно, что концентрация трития в снеговых выпадениях исследуемого региона варьировала от 6 до 32 Бк/л. Относительно низкие концентрации радионуклида (6–8 Бк/л) отмечены в юго-западном и северо-западном направлениях по трансекте Поварня — Рассоха — М. Брусяны — Гагарский и Шиловский — Сарапулка. Несколько повышенные концентрации прослеживаются в южном и юго-восточном направлениях от АЭС (Гусево — 24, Курманка — 32, Малиновка — 22 Бк/л).

Таблица 2.14

Концентрации трития в снеговой воде в период 1997–2003 гг. (март)

Место отбора проб снега	1997 г.	1998 г.	1999 г.	2000 г.	2002 г.	2003 г.
БАЭС, В	95 ± 1*	10 ± 2	19 ± 2	20 ± 1	138 ± 1*	43 ± 1
БАЭС, ЮЗ	25 ± 1	–	–	–	–	–
БАЭС, Ю	–	–	–	21 ± 1	13 ± 1	35 ± 1
БАЭС, СЗ	32 ± 1	–	–	–	–	–
БАЭС, З	–	14 ± 2	93 ± 10*	32 ± 1	34 ± 1	456 ± 2*
Биостанция	–	31 ± 4	29 ± 2	59 ± 1*	32 ± 1	20 ± 1
Биостанция (водоем)	48 ± 0,5	16 ± 1	–	–	–	–
ИРМ, З	–	16 ± 2	26 ± 1	28 ± 1	–	–
ИРМ, С	68 ± 1*	–	–	63 ± 1*	1090 ± 2*	13 ± 1
ИРМ, В	–	22 ± 3	26 ± 1	28 ± 1	–	–
пос. Муранитный	–	25 ± 1	7 ± 1	14 ± 1	–	–
г. Заречный						
центр	32 ± 15	2 ± 1	19 ± 1	17 ± 1	–	–
теплицы	27 ± 1	9 ± 3	–	–	–	–
блинная	–	4 ± 1	13 ± 2	–	–	–
лодочная станция	–	–	8 ± 3	–	–	–
Профилакторий	34 ± 1	–	–	–	–	–
Территория будущего 4-го блока АЭС	37 ± 1	–	18 ± 1	–	–	–
пос. Режик	36 ± 1	16 ± 2	16 ± 1	14 ± 1	14 ± 1	–
пос. Каменка	25 ± 1	3 ± 2	–	–	–	10 ± 1
Плотина	–	9 ± 1	17 ± 1	16 ± 1	17 ± 1	–
Худыш, СЗ	–	14 ± 1	–	–	–	–
Худыш, З	–	16 ± 1	–	–	–	–
УСМ	–	49 ± 2	13 ± 0	–	–	–
СМУ-8	–	9 ± 3	–	–	–	–
Свинарник	–	9 ± 1	–	–	–	–
Среднее	33 ± 3	15 ± 3	18 ± 2	21 ± 2	19 ± 4	24 ± 7

* Данные не включены в расчёт средних значений по исследованной территории.

Приведённые выше результаты мониторинга трития в дождевых и снеговых осадках в зоне расположения Белоярской АЭС и ИРМ позволили выявить вариабельность показателей (от уровня техногенного фона до 1100 Бк/л), обусловленную количеством работающих энергоблоков, расстоянием места отбора проб от источника загрязнения, временем отбора проб. В последнем случае играет роль динамика выбросов, преобладающее направление ветров, погодные условия и другие факторы, которые в работе не исследовались.

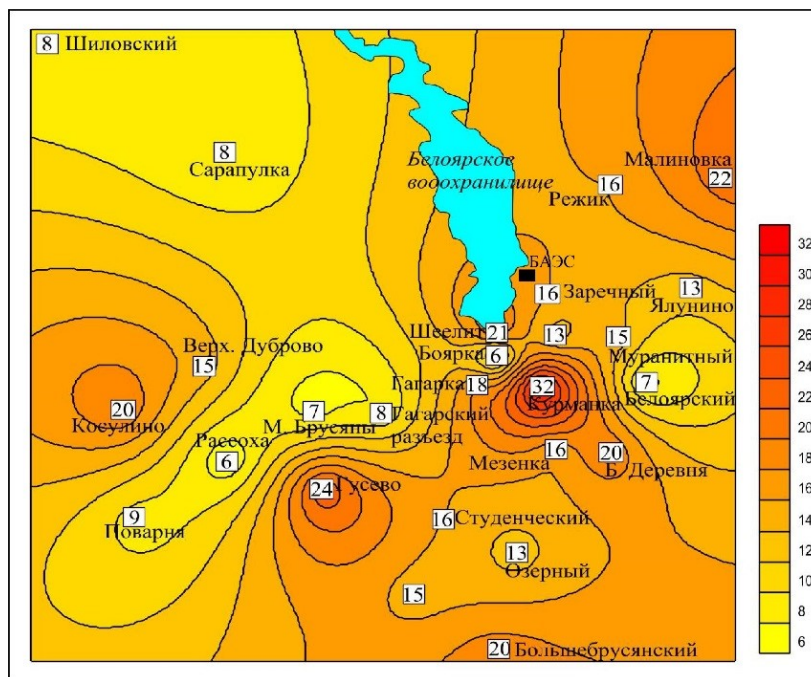


Рис. 2.43. Уровни концентрации трития в снеговой воде в 2010 г., Бк/л

2.7. Источники питьевого водоснабжения населения

Немногочисленные работы по исследованию концентраций трития в подземных, в том числе питьевых водах районов размещения предприятий атомной промышленности, указывают на возможность их надфоновое загрязнения радионуклидом [Радиационная обстановка..., 2001, 2017; Чеботина и др., 2008; Momot et al., 2008; Чеботина, 2011; Янов и др., 2016; Момот, Сынзыныс, 2017]. Уровни концентрации многих радиоактивных загрязнителей, в том числе трития, в глубинных слоях грунта имеют выраженную тенденцию к возрастанию по мере приближения к предприятиям ядерного цикла, местам захоронения радиоактивных отходов и подземным ядерным взрывам [Ершов, Силин, 2005; Чуйков, Досмухамедова, 2006; Загрязнение компонентов..., 2009; Геохимическая специализация..., 2010].

Изучение уровней загрязнения подземных вод тритием в районе Белоярской АЭС проводили в разные периоды функционирования станции. На первом этапе были получены оценочные сведения о содержании трития в питьевой воде некоторых колодцев и скважин в шести различных населённых пунктах наблюдаемой зоны БАЭС в период совместной работы энергоблоков (1981–1989 гг.) (табл. 2.15). Согласно проведённым исследованиям, в указанный период времени концентрация трития в колодцах и скважинах исследуемого региона варьировала от 11 до 49 Бк/л. Средние показатели, характеризующие содержание радионуклида в этих водных экосистемах, имели близкие значения (для колодцев и скважин 30 ± 2 и 26 ± 2 Бк/л соответственно), которые в 5–6 раз превышали уровень техногенного фона.

Выявление повышенных по сравнению с уровнем техногенного фона концентраций трития в воде большинства питьевых источников района БАЭС

привело к необходимости исследовать питьевую воду, поступающую в г. Заречный. Город с населением 27617 человек (на 2017 г.) расположен в 5-километровой зоне БАЭС на берегу Белоярского водохранилища. В систему водоснабжения Заречного вода подается из Каменской скважины глубиной 21 м, расположенной в северо-восточном направлении от БАЭС недалеко от верховья водоёма-охладителя. Мониторинг трития в воде скважины проводили с 1989 по 1999 гг. (когда работал 3-й энергоблок), за этот период его концентрации в скважинной воде варьировали от уровня техногенного фона до 24 Бк/л при среднем значении 12 Бк/л (рис. 2.44). Практически все показатели (за исключением одного) превышали уровень техногенного фона для Уральского региона.

Таблица 2.15

Концентрации трития в воде колодцев и скважин в 1981–1989 гг., Бк/л

Пункт наблюдения	Водный источник	Глубина, м	1981	1982	1983	1984	1985	1989
Режик	Колодец	3	37	40	32	32	27	–
	Скважина	9	–	–	–	–	24	27
		14	–	–	–	–	28	–
		25	–	–	–	–	20	–
		50	–	–	–	–	15	–
	172	–	–	–	–	13	–	
Муранитный	Колодец	9	41	46	46	–	27	22
	Скважина	12	–	–	–	–	31	12
		21	44	48	43	49	42	–
		27	–	–	–	–	34	–
	40	–	–	–	–	14	–	
Мезенка	Колодец	7	–	–	–	–	23	–
		8–10	18	19	–	–	23	–
	Скважина	15	–	–	–	–	17	–
		16	–	–	–	–	19	–
	20	–	–	–	–	16	–	
Каменка	Скважина	21	22; 15	20	18	–	–	11
Кировский	Скважина	15	–	–	–	–	–	11
Заречный	Колодец	4	26	–	22	–	–	
Белоярский	Скважина	–	–	–	–	–	–	11
	Колодец	–	–	–	–	–	–	31

Полученные результаты мониторинга позволили предположить, что тритиевая метка отчасти попадает в Каменскую скважину из Белоярского водохранилища через подземные пути миграции. Об этом свидетельствует наличие положительной корреляционной связи по тритию между водой верховья Белоярского водохранилища и Каменской скважины (коэффициент корреляции 0,77). Возможна также миграция радионуклида из водоносного горизонта, расположенного непосредственно под АЭС.

В 1991–1995 гг. был проведен мониторинг трития непосредственно в горячей сетевой воде г. Заречного (рис. 2.45). Сравнение этих показателей с аналогичными значениями для воды из Каменской скважины в те же годы наблюдений показало, что централизованная вода г. Заречного содержит в среднем на 60 % больше трития, чем вода из Каменской скважины. Это, возможно, связано с подпиткой сети горячего водоснабжения от деаэраторов горячего водоснабжения в период наблюдений.

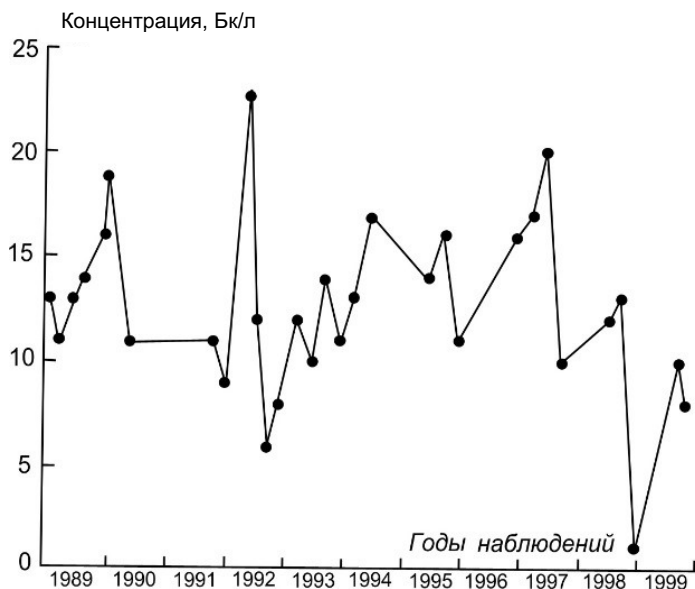


Рис. 2.44. Динамика концентраций трития в воде Каменской скважины

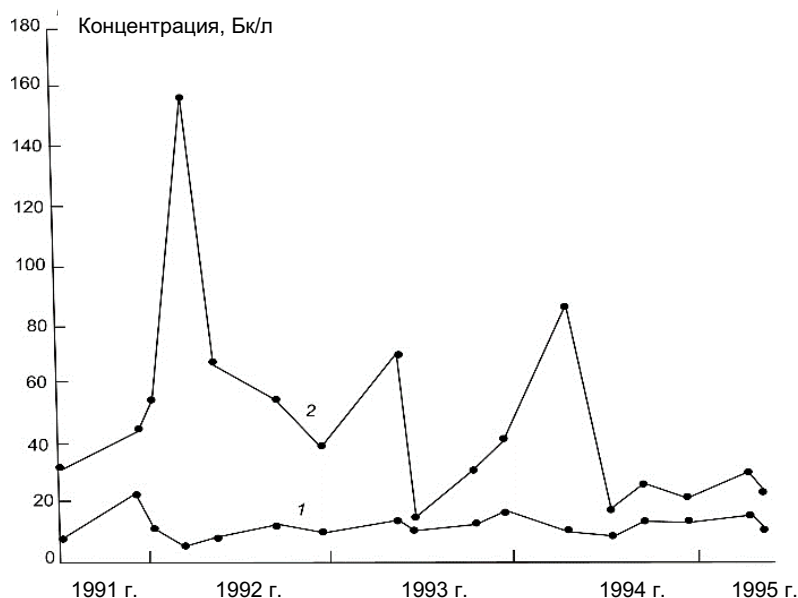
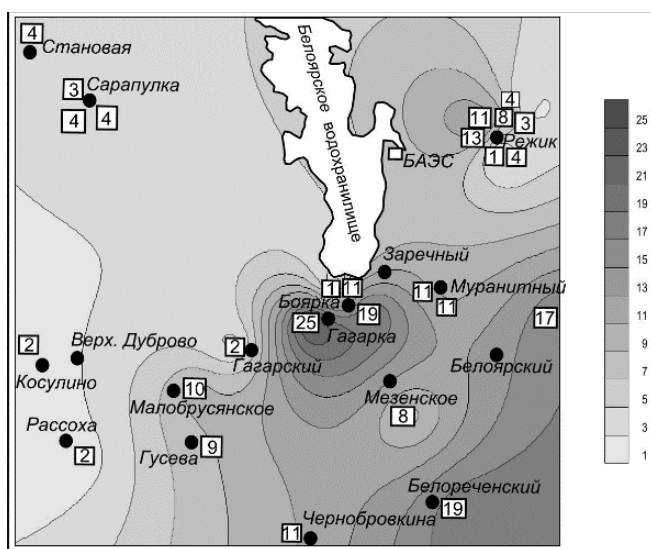
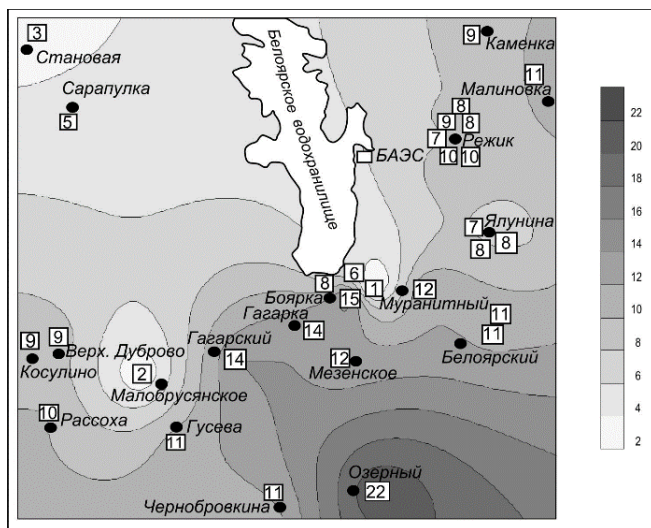


Рис. 2.45. Сравнительные уровни концентраций трития в воде Каменской скважины (1) и в горячей воде центрального водоснабжения г. Заречного (2), 1991–1995 гг.

В 2005–2006 гг. исследовали распространение тритиевого загрязнения в питьевой воде других населённых пунктах, расположенных в зоне воздействия АЭС. Для этого были отобраны пробы воды из различных водных источников в населённых пунктах на расстоянии до 15 км в разных направлениях от атомной станции. Всего было обследовано 26 колодцев и 30 скважин с различной глубиной залегания воды. Кроме того, исследовали воду централизованного водоснабжения (сетевую) в тех пунктах, где оно имеется (10 проб), и воду некоторых родников. Как ранее указывалось, выбор личных скважин и колодцев для отбора проб воды осуществляли случайным образом, а глубину водных источников устанавливали, опрашивая их владельцев. На рис. 2.46 представлены карты-схемы концентраций радионуклида в колодцах и скважинах исследуемого региона.



а



б

Рис. 2.46. Карта-схема распространения трития в воде колодцев (*а*) и личных скважин (*б*) района БАЭС в 2005–2006 гг., Бк/л

Содержание трития в колодезной воде в указанный период времени варьировало от 1 до 25 Бк/л при среднем значении 8,7 Бк/л, в скважинной — от 3 до 22 Бк/л при среднем значении 9,3 Бк/л. Графическая обработка данных в программе Surfer выявила наличие более высоких концентраций радионуклида в воде питьевых источников в пунктах наблюдений, расположенных в южном и юго-восточном направлениях от нижней оконечности Белоярского водохранилища. Под влиянием стока именно в эту часть водоёма-охладителя и далее в реку Пышма мигрируют слаборадиоактивные стоки БАЭС.

Концентрации радионуклида в родниковой воде в указанный период времени варьировали от уровня техногенного фона до 22 Бк/л, в сетевой воде — до 12 Бк/л (табл. 2.17). Судя по средним значениям, родниковая вода в среднем содержит немного больше трития (11 ± 2 Бк/л), чем сетевая (7 ± 1 Бк/л). Последняя, как правило, добывается из глубоких скважин и, в отличие от родников, не контактирует с воздушным пространством (снеговыми и дождевыми выпадениями).

Таблица 2.17

Концентрации трития в воде родников и сетевой воде населённых пунктов в 2005–2006 гг., Бк/л

Населённый пункт	Родники	Сетевая вода
Чернобровка	22	–
Косулино	17	–
Рассоха	5	–
Белореченский	–	2
Гусево	18	–
Малобруснятское	15	
Белоярка	–	12
Баженово	–	2
Малиновка	–	11
Каменка	7	–
Гагарский разъезд	7	7
Сарапулка	6	–
Верхнее Дуброво	17	10
Мезенка	–	11
Режик	12	–
Ялунино	6	–
Студенческий	5	2
Среднее	11 ± 2	7 ± 1

В целом установлено, что за период исследований 2005–2006 гг. приблизительно в 77 % всех водных проб, включая колодцы, скважины, родники и сетевую воду исследуемого региона, уровни концентрации трития в основном превышали техногенный фон. Полученные результаты свидетельствуют о том,

что к моменту исследований на территории, прилегающей к южной оконечности Белоярского водохранилища, формируется зона повышенного загрязнения питьевой воды тритием.

В 2014 г., перед пуском 4-го энергоблока, в прилегающем к АЭС регионе было проведено повторное исследование концентраций трития в грунтовой воде, при этом объектом исследования служили преимущественно личные скважины. В каждом населённом пункте, по возможности, отбирали пробы воды из скважин разной глубины. Всего проанализировано 29 проб скважинной воды с глубины залегания от 10 до 70 м. На рис. 2.47 представлены усреднённые данные по каждому пункту наблюдений. Полученные в 2014 г. результаты в целом подтвердили данные 2005–2006 гг. о наличии зоны надфоновое тритиевого загрязнения, примыкающей к южной оконечности Белоярского водохранилища и реке Пышма.

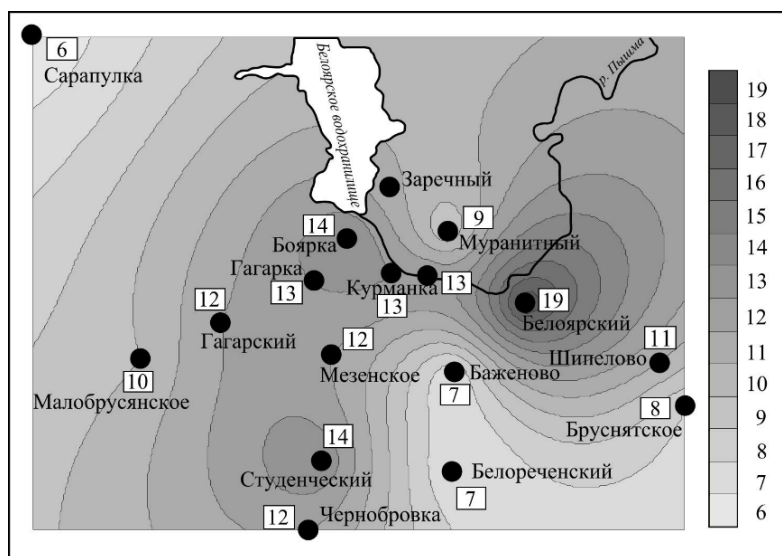


Рис. 2.47. Карта-схема распространения тритиевого загрязнения скважинной воды в районе БАЭС в 2014 г., Бк/л

Результаты исследований концентраций трития во внутригрунтовой воде за описанные выше два периода наблюдений были подвергнуты дополнительному анализу, чтобы выявить зависимость уровня загрязнения от глубины водного источника. Напомним, что глубину водных источников, как правило, устанавливали путем опроса их владельцев. Выявлено, что в воде колодцев, глубина которых в исследуемом районе составляла от 1 до 9 м, содержание трития варьировало от уровня техногенного фона до 20 Бк/л и не зависило от глубины источника (рис. 2.48).

Глубина личных скважин в исследуемом регионе в большинстве случаев не превышала 30 м. В этом диапазоне глубин концентрация трития снижалась с увеличением глубины скважины (рис. 2.49). При этом содержание трития в скважинной воде за 2014 г. оказалось достоверно выше, чем в 2005–2006 гг. ($p < 0,05$). Можно предполагать, что за период наблюдений микроколичества трития мигрировали в более глубокий подпочвенный горизонт, однако эта гипотеза нуждается в более детальном исследовании.

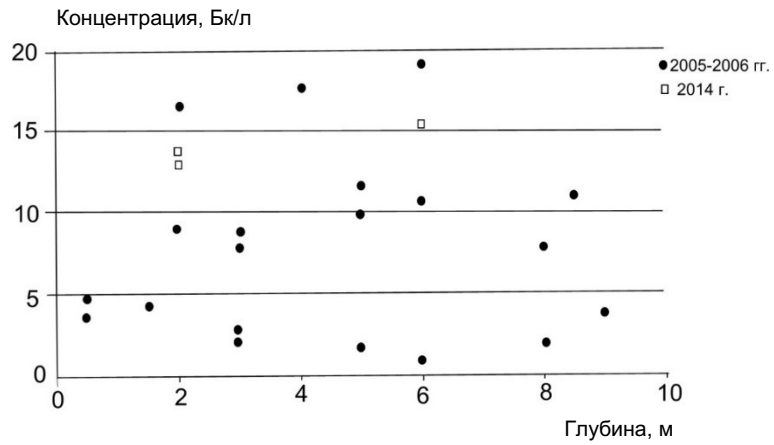


Рис. 2.48. Уровни концентрации трития в воде колодцев зоны влияния БАЭС в зависимости от глубины источника

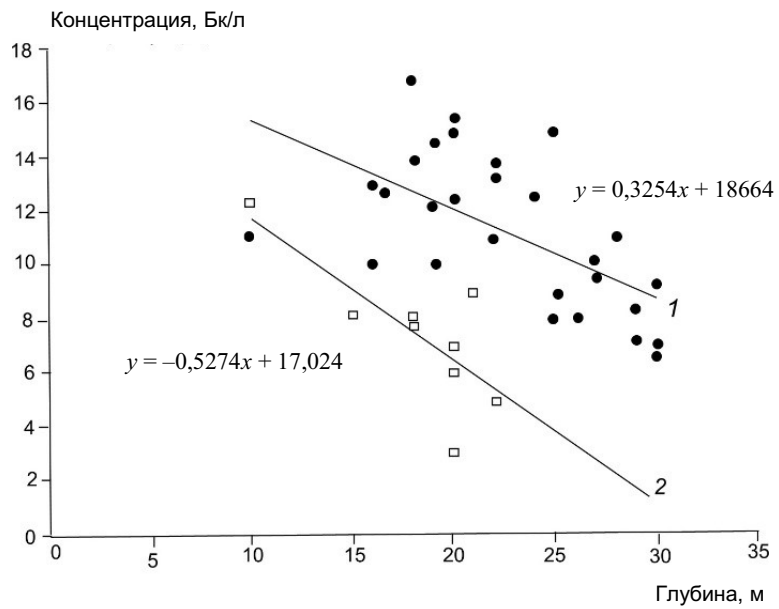


Рис. 2.49. Зависимость концентрации трития в воде личных скважин жителей района БАЭС от глубины источника: 1 — 2014 г.; 2 — 2005–2006 гг.

РАЗДЕЛ 3. СИБИРСКИЙ И ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЕ ОКРУГА

Глава 1. Горно-химический комбинат. Красноярский край

1.1. Описание объекта

Федеральный ядерный оператор ФГУП «Горно-химический комбинат» — предприятие Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом», уникальное атомное производство, не имеющее аналогов в отечественной и мировой практике. Основная миссия Горно-химического комбината (ГХК) в XX в. — реакторная наработка и выделение плутония из облучённого в реакторах естественного урана на радиохимическом производстве — была успешно выполнена [Кучин и др., 2006; Морозов, 2006; Рыженков, Агеева, 2006; Морозов, Рыженков, 2010].

В 1949 г. в Советском Союзе прошло успешное испытание атомного заряда. После Второй мировой войны Соединённые Штаты были единственным «ядерным государством» в мире, и все полагали, что Союз очень далёк от производства собственных бомб. Но после испытания бомбы РДС-1 стало понятно, что у СССР есть всё необходимое для производства оружия — всё, кроме плутония. Поэтому вскоре было принято решение строить сразу два комбината по выработке оружейного плутония.

26 февраля 1950 г. Советом Министров СССР было принято решение о строительстве в Красноярском крае Комбината № 815 (первоначальное наименование Горно-химического комбината). В официальных документах было написано, что на предприятии будут производить теллур-120, на самом же деле теллуrom-120 называли плутоний-239 — ядерную взрывчатку для производства атомных бомб. Для наработки плутония-239 в СССР уже были построены комбинат «Маяк», Сибирский химический комбинат, а Горно-химический комбинат стал третьим таким предприятием.

Из письма Л. П. Берии И. В. Сталину с представлением на утверждение проекта постановления: «В целях укрытия от воздушного нападения намеченного строительством комбината № 815 Специальным комитетом было организовано обследование нескольких районов с естественными возвышенностями для выбора места строительства комбината, позволяющего расположить под землей основные сооружения комбината. Наиболее приемлемой нами признана площадка на реке Енисей, в 50 км от города Красноярска. В сравнении с другими площадками она более удалена от возможных воздушных баз противника и позволяет построить основные сооружения комбината в прочных скалистых породах, с заглублением на 200–230 метров, над крышей самых высоких зданий комбината. Наряду с этим вода реки Енисей удовлетворяет требованиям обеспечения комбината водой».

Быстро воплотить идею строительства подземного комбината было возможно только при одновременной проходке шахтным и тоннельным способами. По предложению заместителя министра МВД (впоследствии — министра среднего машиностроения) А. П. Завенягина было выбрано именно

это место — Атамановский кряж. Здесь хорошо сочетались необходимые условия для строительства такого комбината: район практически не подвержен сейсмическим воздействиям, горный массив сложен прочными кристаллическими породами, в наличии вода, которая крайне необходима для технологического процесса, и, наконец, есть транспортные магистрали: водный путь по Енисею и близкая Транссибирская железная дорога.

Кроме того, Атамановский кряж от подошвы имел высоту более 200 м, подходил непосредственно к урезу воды в Енисее, что позволяло организовать разработку выработок для Комбината № 815 одновременно и с поверхности (на горе) шахтным способом, и с берега Енисея тоннелями (штольнями). Уже в июне 1950 г., без утверждённой проектной документации, только по эскизным проектам института Ленгипрострой, приступили к горнопроходческим работам (рис. 3.1). Начальником строительства назначен генерал-майор инженерно-технической службы Михаил Михайлович Царевский.

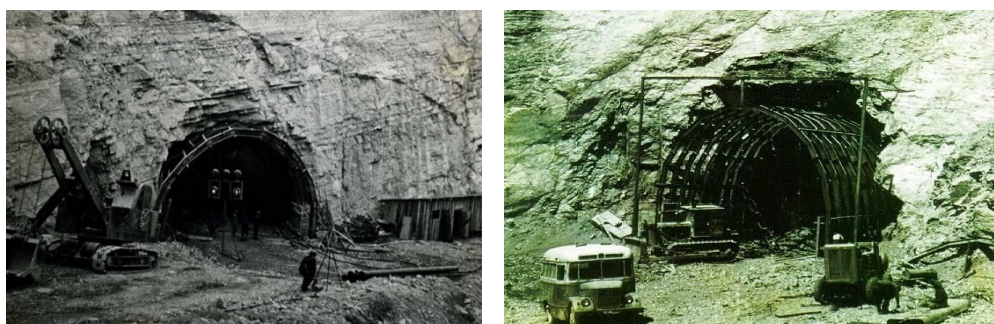


Рис. 3.1. Строительство железнорогского Горно-химического комбината.
Источник: пресс-служба ФГУП «ГУССТ № 9 при Спецстрое России»

В гору врезались сразу четырнадцать колоннами: четыре штольни повели от Енисея, две — из района реки Шумихи и восемь стволов заложили сверху.

Основной руководящий костяк — московские метростроевцы, имевшие богатый производственный опыт проходки тоннелей и камер для станций метрополитена. Но даже их, строивших один из самых больших в мире метрополитенов, поражал объём намечаемых работ на берегу Енисея. Трудно представить себе горные выработки, в которых может поместиться 23-этажное здание. Например, в Большой советской энциклопедии [1954, т. 28, с. 414] читаем: «Комплекс Московского университета на Ленинских горах из 27 основных и 30 вспомогательных зданий имеет общий объём 2 млн 700 тысяч кубических метров».

Объём же горных выработок, выполненный горняками почтового ящика № 9/44, около 15 млн м³, причём все выработки пройдены в очень крепких скальных породах и только буровзрывным способом. Никто и никогда не делал выработок такого объёма.

Осуществили такое строительство в чрезвычайно короткие сроки — всего за восемь лет. Уже 28 августа 1958 г. был введён в эксплуатацию первый реактор АД, с этого дня Горно-химический комбинат вступил в строй действующих предприятий СССР.

Сейчас территория предприятия и санитарно-защитная зона занимают площадь 13,1 тыс. га и покрыты лесным массивом (рис. 3.2).



Рис. 3.2. Карта-схема объектов ГХК в Железногорске (<https://dzen.ru/a/YLFLtrhqexQNuLYT>)

В комплекс входит:

- Горно-химический комбинат, находящийся под землёй;
- Кремниевый завод;
- завод РТ-2;
- площадка 27;
- туннель под рекой Енисей, по которому планировалось перекачивать жидкие радиоактивные отходы на площадку 27, где они, в свою очередь, должны были закачиваться под землю для длительного хранения — не достроен и не функционирует;
 - полигон «Северный», где жидкие радиоактивные отходы закачиваются под землю;
 - хранилища радиоактивных отходов;
 - котельная ГХК;
 - место сброса радиоактивной воды в Енисей от прямоточных ядерных реакторов;
 - бассейны для предварительной выдержки радиоактивной воды от прямоточных реакторов, которые расположены как в непосредственной

близости от Енисея, так и на полигоне «Северный» (бассейн прямоугольной формы в верхней части карты-схемы). Ранее этот открытый бассейн также использовался для хранения среднеактивных жидких радиоактивных отходов; в настоящее время бассейн полностью засыпан 9-метровым слоем земли.

1 сентября 1950 г. для строительства подземных объектов было создано Горное управление (п/я № 9/44), которое возглавил генерал-директор путей и строительства Николай Михайлович Эсакия, заместитель Михаила Царевского. Геологической службой Горного управления руководил Игорь Николаевич Шубин. Уже спустя восемь лет после начала строительства в 1958 г. в горных выработках был построен и запущен первый реактор АД, в 1961 г. — второй реактор АДЭ-1, в 1964 г. — третий реактор АДЭ-2. Первый плутоний в облучённых урановых блоках был выдан с реактора АД в 1958 г.

Долгие годы главными объектами ГХК были реакторы АД, АД-1, АД-2. Все они являются уранграфитовыми, с водяным охлаждением. Завод специально строили вблизи Енисея, откуда и брали воду для охлаждения.

Плутоний-239 производят путем обогащения нейтронами урана-238. В качестве ядерного топлива использовались рабочие блоки цилиндрической формы из природного урана, доставляли их из Новосибирска.

Но создание плутония — не единственное достижение реакторов. Реактор АДЭ-2 использовали для полного энергетического обеспечения города Красноярск-26. Пуск АДЭ-2 позволил утилизировать тепло, которое образуется при делении ядра урана, для выработки электрической и тепловой энергии, а также позволил исключить сброс радиоактивной воды в Енисей. С 1966 г. дома Железногорска отапливались от АТЭЦ.

В 1987 г., после аварии на Чернобыльской АЭС, в СССР начался вывод из эксплуатации промышленных уранграфитовых реакторов.

Железногорский реактор АД проработал до июня 1992 г., АДЭ-1 — до 29 сентября 1992 г., после чего его перевели в безопасное состояние: удалили все делящиеся материалы и охладили конструкцию. В 1995 г. гособоронзаказ по наработке оружия сняли.

Реактор АДЭ-2 проработал вплоть до 2010 г. До этого времени строилось все необходимое для энергетического снабжения города. АДЭ-2 являлся последним российским реактором по выработке оружейного плутония.

Радиохимический завод (в настоящее время — завод фабрикации топлива (ЗФТ)) Горно-химического комбината введен в эксплуатацию 20 апреля 1964 г. Он предназначался для радиохимической переработки облучённых стандартных урановых блоков промышленных уранграфитовых реакторов. Конечным продуктом переработки облучённого топлива являлся уран в виде «плава» и диоксид плутония, изотопный состав которого соответствовал «оружейному качеству».

В настоящее время ведутся работы по выводу из эксплуатации остановленных реакторов по технологии «Захоронение на месте» и подготовка к выводу из эксплуатации отделений первой очереди радиохимического производства в рамках утверждённой концепции.

История изотопно-химического завода (в настоящее время — завод регенерации топлива (ЗРТ)) началась в 1964 г., когда были утверждены объекты пускового минимума завода. В 1985 г. в эксплуатацию введено «мокрое» (водоохлаждаемое) хранилище отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), предназначенное для технологической выдержки под водой ОЯТ реакторов

ВВЭР-1000 перед будущей радиохимической переработкой. Первоначальное хранилище имело вместимость около 6 тыс. т. В период 2008–2011 гг., ещё до событий на Фукусиме, хранилище было реконструировано, что позволило повысить сейсмическую устойчивость комплекса, обеспечить резервирование основных систем безопасности на современной технологической платформе, увеличить вместимость более чем на 2,5 тыс. т и продлить срок эксплуатации хранилища до 2045 г. На хранении в «мокром» хранилище ОЯТ находится отработавшее топливо четырёх российских (Нововоронежской, Балаковской, Ростовской, Калининской), трёх украинских (Южно-Украинской, Хмельницкой, Ровенской) и одной болгарской (АЭС «Козлодуй») атомных станций.

1.2. Полигон «Северный». «Железногорский» ФГУП «НО РАО».

Описание объекта

Полигон «Северный» является геолого-техническим объектом, созданным с целью изоляции жидких радиоактивных отходов (ЖРО), и представляет собой комплекс сооружений для контролируемой закачки ЖРО через систему нагнетательных скважин в водоносные горизонты с застойным характером водообмена, перекрытые водонепроницаемыми породами. Для мониторинга подземного размещения ЖРО используются наблюдательные скважины, которые оборудованы на два эксплуатационных и два буферных горизонта, выделенные в геологическом разрезе района пункта закачки. На сегодня в состав пункта входит 150 скважин: 13 — нагнетательных, 125 — наблюдательных и 12 — разгрузочных. Контроль процесса заполнения подземного хранилища отходами осуществляется методом отбора проб подземных вод с использованием погружных насосов.

Подземное захоронение жидких радиоактивных отходов производится на полигоне «Северный» и заключается в контролируемой закачке ЖРО в глубоко залегающие водоносные горизонты с застойным характером водообмена, изолированные от ниже- и вышележащих горизонтов и от дневной поверхности водоупорными породами (рис. 3.3). Полигон «Северный» используется для глубинного захоронения низкоактивных (НАО) нетехнологических отходов комбината с 1962 г. и среднеактивных отходов (САО) — с 1967 г. Захоронение САО осуществляется в первый горизонт (интервал глубин 355–500 м), НАО — во второй горизонт (интервал глубин 180–280 м) через специально оборудованные скважины. Эксплуатация полигона «Северный» сопровождается контрольными наблюдениями за распределением отходов в недрах, за процессами, там протекающими, и за состоянием окружающей среды: поверхностных и подземных вод, воздуха, почвы и растительности. На полигоне имеется 90 контрольных (наблюдательных) скважин.

Жидкие радиоактивные отходы поступают из ГХК на полигон по специальным магистралям в район нагнетательных скважин и дальше нагнетаются в подземные горизонты. Запрещено принимать на полигон ЖРО с других предприятий кроме ГХК. Ввод в эксплуатацию — 1967 г. Объём захороненных РАО — 6,5 млн м³, объём ежегодного захоронения — 100 тыс. м³.

На полигоне для закачки используют два горизонта в горном отводе, первый — на глубине 355–500 м, второй — на глубине 180–280 м. Объём (мощность) первого горизонта — 14 млн м³, второго — 18 млн м³.

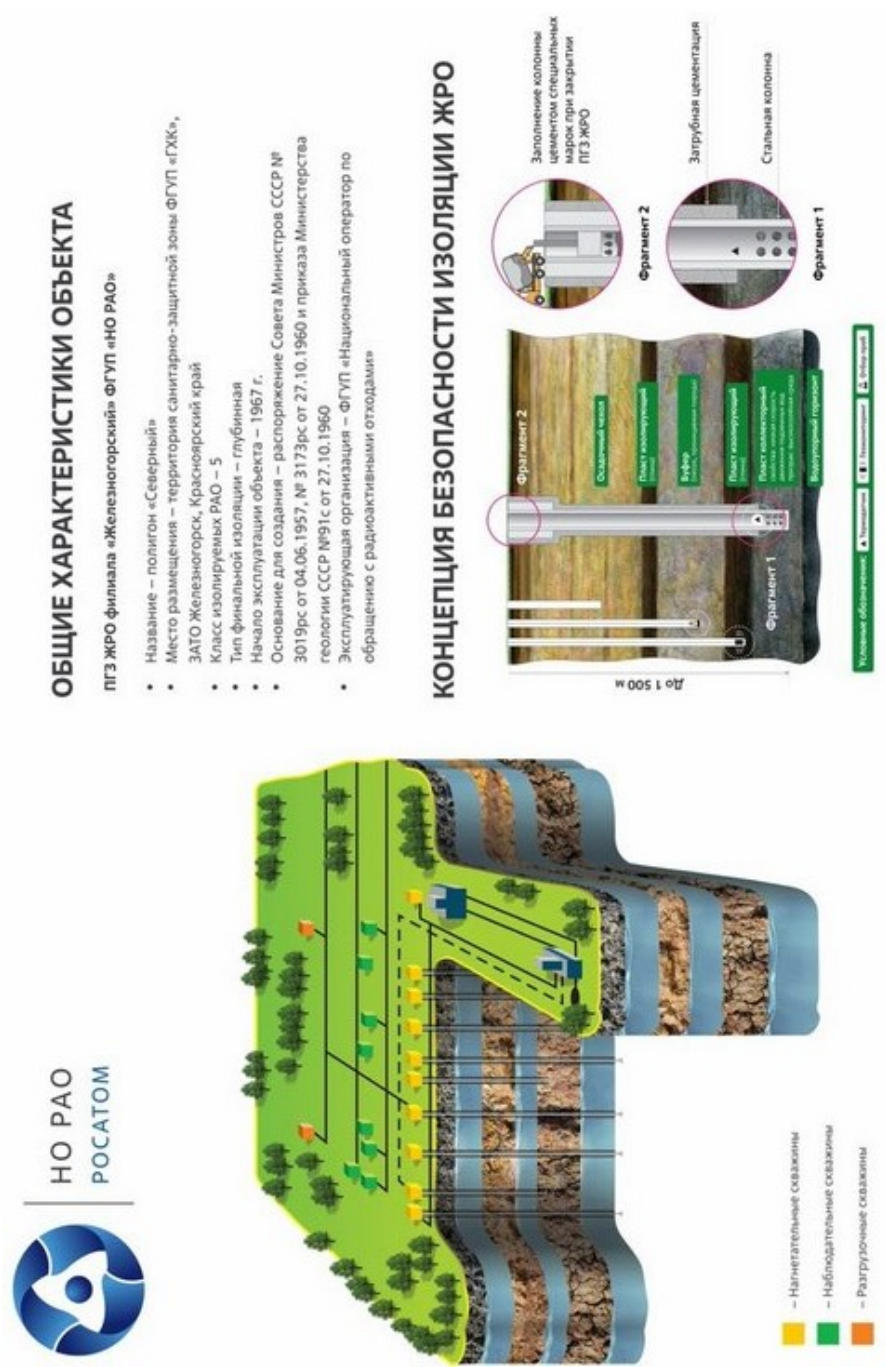


Рис. 3.3. Схема полигона «Северный». Фото пресс-службы «НО РАО»

Подземный горизонт представляет собой линзу с геологическими отложениями в виде песчаных пластов, которые затрудняют водообмен и выход воды за пределы линз. Поэтому закачиваемая вода распространяется от нагнетательных скважин не больше чем на 100 м. Скорость движения воды по направлениям разгрузки около 5–15 м в год. Радиоактивные вещества оседают на породах, в результате чего происходит самоочистка воды. Давление с подземных горизонтов снимается через разгрузочные скважины, поэтому давление в линзах всегда минимальное. Всего на полигоне используется около 150 скважин, которые делятся на нагнетательные, разгрузочные и наблюдательные. Наблюдательные скважины, при помощи которых контролируется горный отвод, расположены примерно в 8–10 км от линз по направлению разгрузки. Река Енисей отгорожена от полигона тектоническим нарушением, в котором породы сместились и создали естественный барьер. На рис. 3.4. приведена схема расположения ПГЗ ЖРО полигон «Северный» и зон наблюдений в районе ФГУП «ГХК». На основании этой схемы изучались объекты питьевого водоснабжения населения территории и оценивался общий уровень загрязнения территории тритием.

1.3. Поверхностные водные объекты бассейна реки Енисей — участок среднего и нижнего течения

Анализ литературных данных по радиационно-химическому состоянию среднего течения реки Енисей показал, что существует несколько вероятных потенциальных источников поступления трития в воду с водосборной территории, а именно:

- 1) в результате испытаний ядерного оружия;
- 2) в результате аэрозольных выбросов ГХК;
- 3) со сбросами вод систем охлаждения реактора;
- 4) со сбросами низкоактивных жидких отходов, образовавшихся в результате работы радиохимического производства;
- 5) путём миграции из открытых водоёмов отстойников на промплощадке комбината;
- 6) путём миграции из подземных горизонтов полигона «Северный».

Следовательно, в период функционирования атомных реакторов ГХК существовало шесть потенциальных источников поступления трития в Енисей; тем самым создавалась уникальная ситуация, которая позволяла исследовать самые разные пути миграции трития в окружающей среде.

Для оценки воздействия и определения вклада в загрязнение Енисея этих источников в 1998 г. были исследованы выпуски сточных вод комбината, ручьёв, стекающих с его территории и впадающих в реку в пределах санитарно-защитной зоны, а также водотоков, в долины которых может предположительно происходить разгрузка водоносных горизонтов, используемых для закачки жидких радиоактивных отходов на полигоне «Северный».

Исследования включали гидрометрическое измерение расхода воды, дозиметрическое измерение поперечных профилей пойм водотоков и отбор проб воды, донных отложений, пойменных почв, а также гидробионтов для радионуклидного и химического анализов.

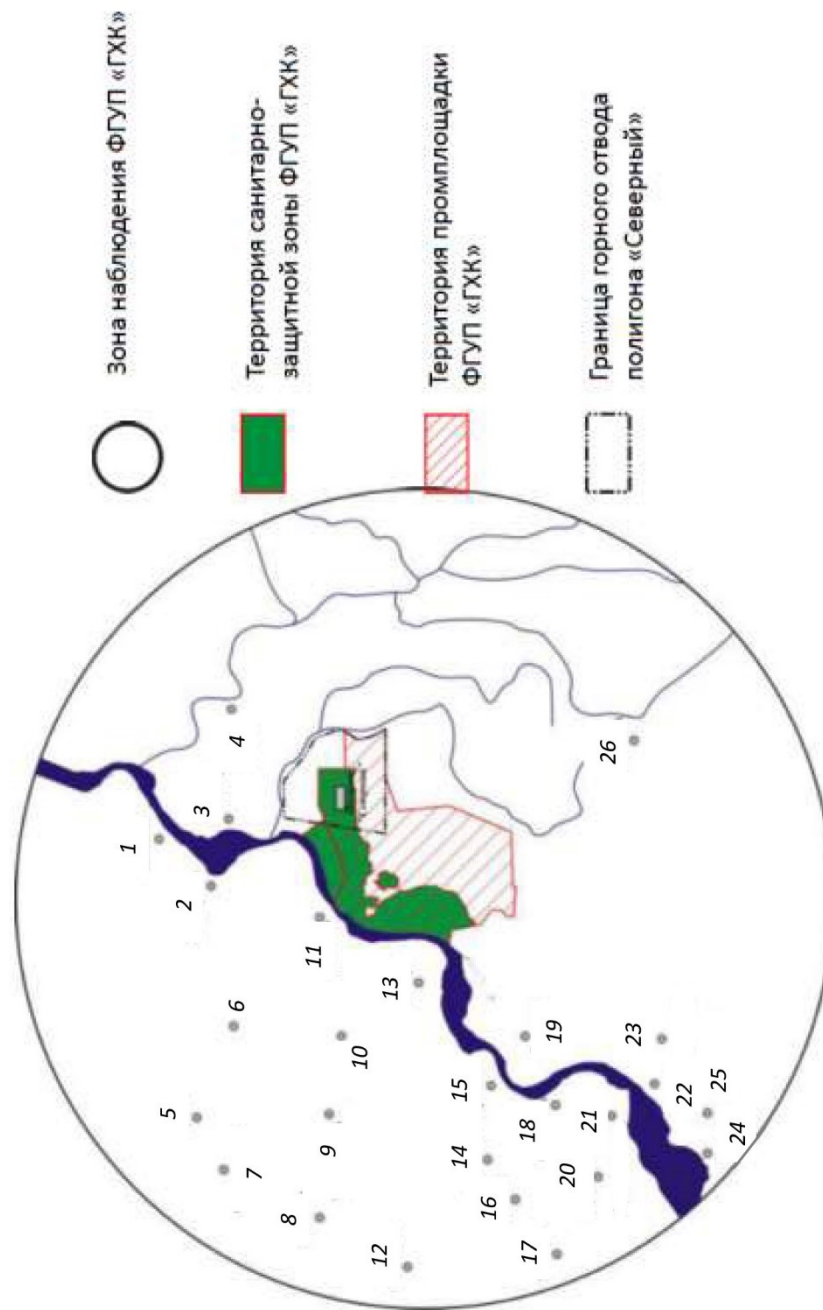


Рис. 3.4. Карта-схема расположения ПЗ ЖРО полигон «Северный» и зон наблюдений в районе ФГУП «ГХК»:
 1 — Кононово; 2 — Хлопуново; 3 — Большой Балчуг; 4 — Подпорог; 5 — Бузим; 6 — Мингуль; 7 — Сухобузимское; 8 — Подсопки;
 9 — Толстомысово; 10 — Большие пруды; 11 — Атаманово; 12 — Иркутское; 13 — Шивера; 14 — Карымская;
 15 — Барабаново; 16 — Татарская; 17 — Минжуль; 18 — Куваршино; 19 — Додоново; 20 — Серебряково;
 21 — Частоостровское; 22 — Тартаг; 23 — Новый путь; 24 — Есаулово; 25 — Сосновоборск; 26 — Кедровый

Особое место в исследованиях занимал тритий, присутствие которого связано со многими технологическими процессами комбината. Его содержание в жидких сбросах при нормальной работе ядерных реакторов и радиохимического производства, как правило, намного превосходит концентрацию остальных радионуклидов, в газообразных выбросах в окружающую среду по количеству он уступает только радиоактивным благородным газам [Бадаев и др., 1990; Журавлев, 1990]. Тритий отличается большим периодом полураспада (12,3 года), вследствие чего является глобальным загрязнителем природных комплексов. И, наконец, это один из наиболее подвижных радионуклидов, что определяет его высокую миграционную способность в природных системах. В отличие от других радионуклидов, тритий поступает в окружающую среду, минуя очистные барьеры, с жидкими стоками в виде тритиевой воды НТО (T_2O) и с газообразными выбросами в атмосферу. Инкорпорированный тритий эффективно включается в состав биологической ткани, вызывая мутагенные нарушения, как за счёт β -излучения (средняя энергия 5,8 кэВ), так и вследствие нарушения молекулярных связей, вызванных заменой изотопа водорода нейтральным гелием, образовавшимся в результате распада трития [Королев, Иванов, 1983].

На рис. 3.5 приведены данные по содержанию трития в пробах воды реки Енисей. Полученные результаты показывают, что содержание трития в речной воде в фоновых районах (г. Красноярск — «0 км» и с. Есаулово — «46 км») выше по течению от ГХК за всё время исследований не превышало 4 ± 2 Бк/л.

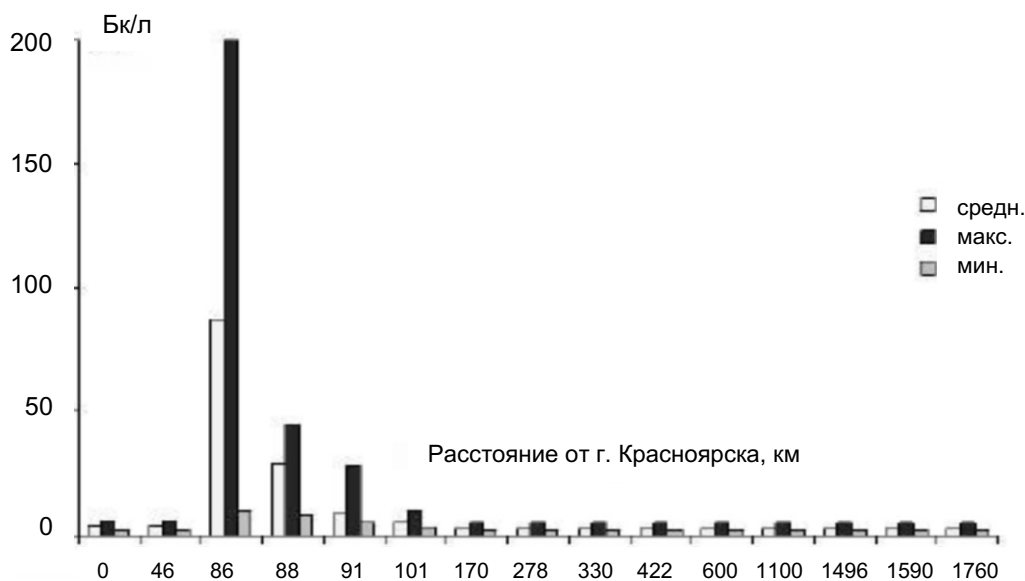


Рис. 3.5. Содержание трития в водном потоке реки Енисей в зависимости от расстояния от г. Красноярск

На участке реки ниже от сбросов ГХК (15 км вниз по течению) содержание трития в основном русле Енисея также не превышало значений примерно 6 Бк/л, что совпадает с данными, полученными ранее [Bondareva, Schultz, 2015], и литературными данными [Махонько и др., 2001; IRSN, 2012]. Согласно этим данным, среднегодовая концентрация трития в воде Енисея в прошедшие годы составляла 4–5 Бк/л и не превышала среднего содержания трития в водоёмах

России, образовавшегося в результате ядерных испытаний и считающегося глобальным содержанием трития в водных источниках [Бадаев и др., 1990; Иваницкая, Малофеева, 2001; Махонько и др., 2001].

Таблица 3.1

Содержание трития в пробах воды,
отобранных в реке Енисей в районе сбросов ГХК

Водный объект и место отбора (расстояние от г. Красноярск)	Год отбора	Содержание ^3H , Бк/л			
		июнь	июль	август	сентябрь
Устье р. Шумиха (81 км)	2001	—*	70 ± 10	81 ± 8	75 ± 11
	2003	11 ± 2	—	18 ± 3	18 ± 8
	2004	28 ± 10	60 ± 25	18 ± 8	105 ± 42
	2005	25 ± 6	161 ± 44	45 ± 9	—
	2007	—	—	52 ± 4	—
	2008	—	38 ± 6	—	—
Устье р. Плоский (86 км)	2001	—	168 ± 25	120 ± 4	120 ± 10
	2003	11 ± 3	—	33 ± 4	—
	2004	153 ± 42	35 ± 12	40 ± 10	110 ± 36
	2005	41 ± 8	200 ± 57	23 ± 5	—
	2006	35 ± 10	78 ± 6	17 ± 4	—
Устье р. Плоский (86 км)	2007	27 ± 6	43 ± 4	53 ± 6	31 ± 9
	2008	42 ± 6	15 ± 2	62 ± 4	29 ± 3
	2009	53 ± 6	39 ± 7	32 ± 4	—
	2010	—	—	15 ± 2	10 ± 4
	2011	—	11 ± 3	10 ± 5	—
	2012	8 ± 2	10 ± 2	10 ± 3	9 ± 2
с. Атаманово (87 км, вблизи правого берега)	2002	—	3 ± 1	3 ± 1	3 ± 1
	2003	29 ± 4	—	7 ± 2	—
	2004	19 ± 3	7 ± 5	6 ± 2	10 ± 5
	2005	31 ± 4	34 ± 5	5 ± 2	—
	2006	17 ± 4	38 ± 6	6 ± 3	21 ± 3
	2007	15 ± 3	21 ± 6	31 ± 5	17 ± 6
	2008	21 ± 4	9 ± 3	27 ± 6	16 ± 4
	2009	27 ± 4	31 ± 7	24 ± 5	—
	2010	—	—	7 ± 4	6 ± 3
	2011	—	3 ± 1	6 ± 2	—
	2012	4 ± 2	3 ± 1	5 ± 1	4 ± 2

* Не определяли.

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о том, что радиоактивные сбросы трития в результате деятельности ГХК практически

не повлияли на общее содержание трития в основном русле реки Енисей, однако в ближней зоне влияния ГХК и вдоль правого берега Енисея было зафиксировано существенное превышение содержания трития в воде — до 200 Бк/л (табл. 3.1, рис. 3.5).

Полученные данные согласуются с ранее приведёнными показателями: для устья ручьёв Плоского и Шумиха, протекающих с санитарно-защитной зоны ГХК, концентрация трития превышает фоновые значения, принятые для Енисея, следовательно, они являются источниками поступления трития в реку.

Кроме того, полученные результаты показывают, что реакторная струя распространяется вдоль правого берега, так как содержание трития в этих пунктах отбора также выше фонового для трития в исследуемом районе.

Проведённые γ -спектрометрические исследования проб, отобранных в районе стоков ГХК, выявили наличие активационных радионуклидов (табл. 3.2). Это свидетельствует о том, что источником образования трития служил последний действующий реактор ГХК, который использовал воду реки Енисей для охлаждения.

Таблица 3.2

Содержание радионуклидов в пробах воды после концентрирования, отбор в районе сбросов ГХК, Бк/л

№ п/п	Радионуклид	Период 2007–2009 гг.	Период 2010–2016 гг.
1	^{24}Na	$0,6 \pm 0,2 \dots 2,5 \pm 1,4$	<МДА
2	^{46}Sc	$0,054 \pm 0,002 \dots 0,24 \pm 0,01$	<МДА $0,016 \pm 0,002$
3	^{51}Cr	$1,70 \pm 0,07 \dots 6,7 \pm 0,2$	<МДА $0,47 \pm 0,04$
4	^{54}Mn	$0,014 \pm 0,003 \dots 0,09 \pm 0,02$	<МДА $0,007 \pm 0,002$
5	^{59}Fe	$0,03 \pm 0,003 \dots 0,16 \pm 0,01$	<МДА $0,011 \pm 0,002$
6	^{60}Co	$0,060 \pm 0,003 \dots 0,17 \pm 0,008$	<МДА $0,015 \pm 0,004$
7	^{65}Zn	$0,024 \pm 0,003 \dots 0,11 \pm 0,01$	$0,019 \pm 0,005 \dots 0,055 \pm 0,007$
8	^{76}As	$1,5 \pm 0,1 \dots 8,5 \pm 0,6$	<МДА
9	^{85}Sr	$0,003 \pm 0,001 \dots 0,014 \pm 0,003$	<МДА
10	^{99}Mo	$0,027 \pm 0,003 \dots 0,078 \pm 0,007$	<МДА
11	^{103}Ru	$0,020 \pm 0,003 \dots 0,027 \pm 0,004$	<МДА
12	^{106}Ru	$0,04 \pm 0,02 \dots 0,078 \pm 0,025$	<МДА
13	^{124}Sb	$0,006 \pm 0,001 \dots 0,024 \pm 0,003$	<МДА
14	^{131}I	$0,042 \pm 0,004 \dots 0,051 \pm 0,013$	<МДА
15	^{137}Cs	$0,058 \pm 0,007 \dots 0,09 \pm 0,02$	$0,022 \pm 0,002 \dots 0,057 \pm 0,005$
16	^{141}Ce	$0,015 \pm 0,002 \dots 0,048 \pm 0,006$	<МДА
17	^{144}Ce	$0,048 \pm 0,007 \dots 0,13 \pm 0,02$	<МДА
18	^{239}Np	$2,35 \pm 0,04 \dots 29,5 \pm 1,4$	<МДА

Единично в пробах воды отмечено присутствие долгоживущего изотопа осколочного изотопа ^{152}Eu ($T_{1/2} = 13,6$ лет, $\sim 0,04\text{--}0,06$ Бк/л), а также короткоживущего активационного радионуклида ^{58}Co ($T_{1/2} = 71,3$ дня, $\sim 0,03\text{--}0,07$ Бк/л). Для предварительного концентрирования в качестве метки использовался радионуклид ^{241}Am , химический выход которого составлял 95–97 %.

Тритий удобно использовать в качестве индикатора трассера природно-техногенных процессов, влияния сброса сточных вод и выявления возможного взаимодействия подземных вод, загрязнённых в результате закачки жидких радиоактивных отходов на полигоне «Северный», с поверхностными водами в зоне влияния комбината [Рыбальченко и др., 1994].

Содержание трития в течение практически всего периода исследования для большинства участков реки Большая Тель превышало фоновые значения реки Енисей и достигало приблизительно 63 Бк/л (табл. 3.3).

Таблица 3.3

Результаты определения содержания трития в пробах воды, отобранных в реке Большая Тель

Расстояние от устья	Год отбора	Содержание ^3H , Бк/л			
		Июнь	Июль	Август	Сентябрь
50 м	2001	–	–	5,6 ± 0,6	35 ± 5
	2002	–	–	5,4 ± 1,2	13 ± 3
	2003	6,2 ± 1,1	8 ± 1	5,2 ± 0,9	12 ± 2
	2004	–	43 ± 8	33 ± 16	28 ± 12
	2005	17 ± 4	63 ± 5	8 ± 3	–
	2007	8 ± 1	28 ± 12	43 ± 12	10 ± 2
	2008	18 ± 2	24 ± 3	35 ± 5	12 ± 2
300 м	2001	–	–	9 ± 1	21 ± 3
	2002	–	–	4,7 ± 0,6	23 ± 3
	2003	5,1 ± 1,6	4,8 ± 1,2	–	–
	2004	13 ± 5	10 ± 7	5 ± 2	23 ± 3
	2005	42 ± 8	19 ± 4	5 ± 2	–
	2007	21 ± 6	24 ± 4	7 ± 3	15 ± 4
	2008	28 ± 3	24 ± 4	37 ± 4	12 ± 4
500 м	2001	–	–	4,2 ± 0,8	15 ± 3
	2002	–	–	3,7 ± 0,6	40 ± 3
	2003	3,1 ± 0,7	5,1 ± 1,6	21 ± 3	–
	2004	18 ± 3	20 ± 3	8 ± 5	21 ± 3
	2005	41 ± 6	8 ± 2	< 3	–
	2007	27 ± 6	11 ± 3	5 ± 2	8 ± 3
	2008	20 ± 3	28 ± 6	23 ± 4	13 ± 3
1000 м	2001	–	–	4,1 ± 0,8	–
	2002	–	–	7,0 ± 2,0	33 ± 4
	2003	5,7 ± 1,5	2,5 ± 1,0	13,5 ± 0,7	–
	2004	18 ± 7	28 ± 10	38 ± 10	23 ± 12
	2005	11 ± 2	16 ± 4	12 ± 4	–
	2007	8 ± 3	10 ± 3	15 ± 4	18 ± 6
	2008	21 ± 3	21 ± 4	37 ± 3	15 ± 2

Полигон «Северный» расположен в 12 км к северу от радиохимического завода на водоразделе рек Енисея и Большая Тель. Основная область питания водоносных горизонтов находится в 4–7 км южнее полигона захоронения. Для захоронения жидких радиоактивных отходов используют водоносные горизонты I и II, расположенные в центральной части на глубине 370–465 и 180–280 м соответственно. Горизонт II разгружается в долину реки Б. Тель, горизонт I, как предполагается, частично в долину реки Кана (12–14 км к северу от полигона), частично в долину реки Б. Тель путём медленного перетекания в горизонт II [Рыбальченко и др., 1994; Иваницкая, Малофеева, 2001].

Полигон начал функционировать с 1967 г. К настоящему времени в два его водоносных горизонта закачано около 5 млн м³ жидких радиоактивных отходов суммарной активностью с учётом радиоактивного распада к 1995 г. около 10 ЭБк ($1 \cdot 10^{19}$ Бк) [Рыбальченко и др., 1994]. Отходы, наряду с радиоактивными продуктами, содержат и нерадиоактивные химические компоненты переработки ОЯТ.

В августе 1998 г., во время проведения комплексной радиэкологической экспедиции, были отобраны пробы воды для определения содержания трития в водотоках, имеющих водосборные площади в санитарно-защитной зоне комбината. Гидрографическая схема района исследований и места отбора проб приведена на рис. 3.6. Исследования выполняли на 10 водотоках. Пробы анализировали жидкостно-сцинтилляционным методом регистрации с обогащением [Методы измерения..., 1978; Исследование выноса..., 2001]. Сведения о концентрации трития в обследованных водотоках приведены в табл. 3.4.

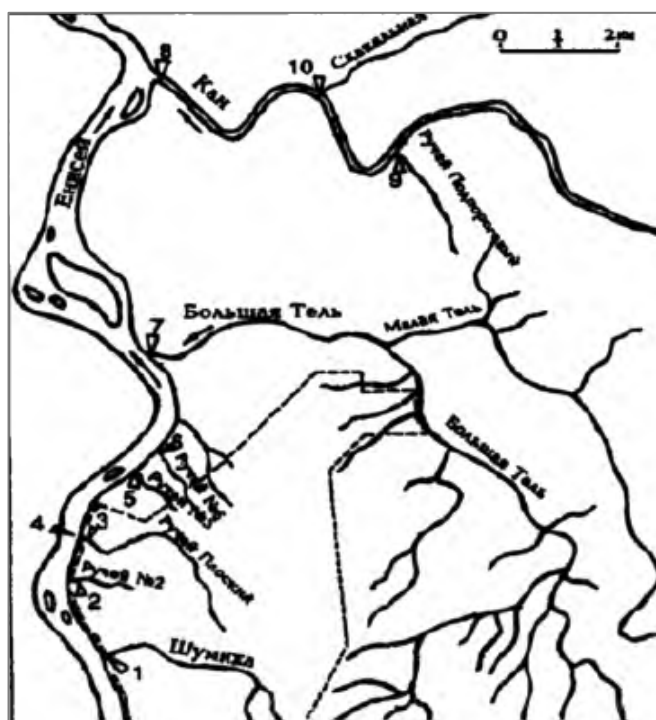


Рис. 3.6. Схема гидрографической сети в районе исследований с нанесёнными точками отбора проб: V — место отбора пробы; - - - — граница санитарно-защитной зоны [Исследование выноса..., 2001]

Таблица 3.4

Концентрация трития и расход воды в водотоках зоны влияния Красноярского ГХК в летне-осеннюю межень 1998 г. [Исследование выноса..., 2001]

Номер пробы на рис. 3.6 и водный объект	Концентрация, Бк/л	Расход воды, м ³ /с	
		измеренный	расчётный
1. Шумиха	124,8±3,9	0,45	0,04
2. Ручей № 2	8,2±0,3	0,3	0,02
3. Ручей Плоский	56,4±1,9	0,08	0,04
4. Енисей в створе выпуска сточных вод ГХК	4,0±0,2	–	–
5. Ручей № 5	36,6±1,6	0,03	0,01
6. Ручей № 6	5,2±0,2	0,06	0,02
7. Река Большая Тель	4,0±0,2	–	1,03
8. Река Кан	4,3±0,2	–	71,8
9. Ручей Подпороговый	5,3±0,2	–	–
10. Река Скальная	3,2±0,2	0,01	0,02

Из литературных данных известно, что в подземные горизонты полигона закачивали в течение многих лет до 330 кБк/л трития [Рыбальченко и др., 1994].

В настоящее время фоновое содержание трития в поверхностных водах, в том числе сибирских рек, составляет примерно 3,4–4,2 Бк/л [Мониторинг трития в природных..., 2009]. Максимальная фоновая концентрация наблюдалась в период термоядерных испытаний в атмосфере. С тех пор за счёт естественного распада происходит уменьшение концентрации трития. Так, его содержание в воде Енисея в 1984 г. составляло 10,6–11,2 Бк/л, в 1993 г. — 3,4–4,4 Бк/л. Наименьшая концентрация трития, близкая к фоновой, — 3,2 Бк/л отмечалась в устье Скальной — правом притоке реки Кана, в устьях рек Большая Тель, Кана и Енисея в створе сброса сточных вод комбината [Исследование выноса..., 2001].

Повышенная по сравнению с фоном концентрация трития обнаружена в воде ручьёв, водосборы которых расположены в пределах санитарно-защитной зоны: ручей Плоский — 56 Бк/л, ручей № 5 — 37 Бк/л. Максимальная концентрация трития наблюдалась в устье Шумихи — 125 Бк/л. Следует отметить, что эта концентрация не представляет экологической опасности, так как более чем в 60 раз ниже уровня вмешательства, установленного для питьевой воды Нормами радиационной безопасности НРБ-99 [2009]. Концентрация трития в ручье Подпороговом, впадающем в реку Кан слева в 17 км от устья, является индикатором возможной связи поверхностных вод с областью разгрузки подземных горизонтов, являющихся коллекторами для закачки жидких радиоактивных отходов на полигоне «Северный», где концентрация трития в четырёх скважинах составляет 1, 5,6, 20, 56 кБк/л [Исследование выноса..., 2001]. Концентрация в устье ручья Подпорогового невелика — всего в 1,3 раза выше фоновой. Несмотря на то, что были проведены единичные измерения, немного повышенная концентрация здесь даёт основание предположить

возможную гидрологическую связь поверхностных вод с областью разгрузки загрязнённых подземных горизонтов полигона «Северный». На вынос загрязняющих веществ ручьями с территории комбината большое влияние оказывает распределение стока по территории, генезис и режим, внутригодовая и многолетняя изменчивость водного стока. Распределение естественного природного стока водотоков на исследуемой территории отличается большой неравномерностью в течение года: в периоды весеннего половодья и летне-дождевых паводков сток составляет 86 % годового, в летне-осеннюю межень — 10 %, зимнюю — 4 %. Полевые исследования выполнялись в период гидрологической летне-осенней межени при небольшой водности ручьев, когда модуль стока составляет 2,8 л/(с·км²) при коэффициенте вариации 0,23. Расход воды ручьев в период весеннего снеготаяния в 20–25 раз, в период летних дождевых паводков в 5–6 раз выше, чем в летне-осеннюю межень. Основная часть годового водного стока приходится на период весеннего половодья. В этот же период выносятся и наибольшее количество загрязняющих веществ.

Кроме того, источником поступления трития могут быть смывы атмосферными осадками наносов с территории санитарно-защитной зоны ГХК и перенос в виде аэрозолей потоками воздушных масс. Для выявления вклада поступления трития воздушно-аэрозольными путями исследовались атмосферные осадки (снег) и растительные остатки (хвоя и листовая опад) в зоне влияния ГХК (см. рис. 3.4).

Годовой вынос загрязняющих веществ водотоками определяли по формуле [Международное руководство..., 1984; Пособие по определению..., 1984]

$$M = \sum_{i=1}^n C_i Q_i,$$

где C_i , Q_i — концентрация вещества и водный сток за i -й расчётный период соответственно; n — число расчётных периодов. Расчётными являются периоды с различным генезисом формирования водного стока. Расход воды и концентрация трития в ручьях были измерены только в период летне-осенней межени.

Согласно данным, используемым для расчёта авторами работы [Исследование выноса..., 2001], среднегодовой вынос трития в Енисей определён ориентировочно и составлял около 2 ТБк ($2 \cdot 10^{12}$ Бк). Для сравнения было отмечено, что среднегодовой перенос трития водой Енисея в створе ниже сброса комбината составлял около 400 ТБк (оценка выполнена исходя из фоновой концентрации).

Водный сток в ручьях состоит из трёх составляющих: поверхностного склонового стока, непосредственно поступающего в русловую сеть; подземного притока в русловую сеть; сточных вод, сбрасываемых в русловую сеть. Поверхностный склоновый сток, вымывающий загрязняющие вещества с почвы, формируется на водосборах в период снеготаяния и дождей. В период летне-осенней межени он отсутствует, и речной сток формируется по большей части подземными водами.

Рассчитанный в соответствии с рекомендациями [Международное руководство..., 1984; Пособие по определению..., 1984] расход воды подземного притока в русловую сеть для периода летне-осенней межени приведен в табл. 3.4.

Для расчёта использовали данные гидрометрических измерений гидрологического поста на реке Большая Тель в пос. Большой Балчуг, где проводились наблюдения с 1945 по 1995 гг. Площади водосборов ручьёв определены по картам масштабом 1:50000. Разница между измеренным и рассчитанным расходом воды реки Шумихи, ручьёв №№ 2, 5 и 6 может служить ориентировочным показателем объёма загрязнённых техногенных вод, поступающих в ручьи с территории санитарно-защитной зоны комбината. Выполненная работа показывает необходимость тритиевого мониторинга в зоне влияния комбината и полигона «Северный». Учитывая важность проблемы долгосрочного загрязнения реки Енисей в дальнейшем, по нашему мнению, следует провести более детальное изучение содержания трития прежде всего в ручьях и водотоках, впадающих в реку Кан, в различные гидрологические периоды формирования стока.

В нашем случае, для расчёта выноса трития с отдельными притоками реки Енисей в зоне влияния ГХК использовались результаты определения содержания трития в воде и литературные данные [Исследование выноса..., 2001] по расходам воды в устьях притоков (табл. 3.5).

Таблица 3.5

Расчет максимального выноса трития
исследуемыми правобережными притоками реки Енисей

Водоём	Расход воды, м ³ /с	Расчёт выноса трития, ГБк
Река Шумиха	0,45	1494
Ручей № 2	0,32	190
Ручей Плоский	0,08	278
Река Большая Тель	1,03	912
Всего		2874

Из приведённых данных следует, что наибольший вклад в вынос трития приходится на ручей Шумиха и реку Большая Тель. Суммарный вынос трития по анализируемым притокам составляет приблизительно 2,9 ТБк в год. Были рассчитаны содержание трития в главном русле реки и данные по среднегодовому расходу воды в устье Енисея.

Получено, что вынос трития рекой Енисей в акваторию Карского моря составлял $18 \cdot 10^{14}$ Бк трития в год. В связи с тем, что содержание трития в основном русле реки Енисей находится на уровне фоновых значений для исследуемого района (4–6 Бк/л), рассчитанный вынос трития соответствует именно глобальному переносу радионуклида в водной экосистеме. Следовательно, функционирование ГХК не оказывает влияние на вынос трития Енисеем.

Таким образом, содержание трития в воде Енисея в ближней зоне влияния ГХК на время функционирования реактора превышало фоновые значения для реки до 20 раз. Поступление происходило и в результате деятельности ГХК, и с подземных водоносных горизонтов полигона «Северный», который разгружается в пойму реки Большая Тель и затем в реку Енисей. С учётом водности Енисея выносимый тритий разбавляется до фоновых значений, соответствующих глобальному уровню содержания трития в исследуемом регионе (4–5 Бк/л).

1.4. Оценка загрязнения территории аэрозольным переносом трития

Источником поступления трития могут быть смывы атмосферными осадками наносов с территории санитарно-защитной зоны ГХК и перенос в виде аэрозолей потоками воздушных масс. Для выявления вклада поступления трития воздушно-аэрозольными путями исследовались атмосферные осадки (снег) и растительные остатки (хвоя и листовая опад) в зоне влияния ГХК (см. рис. 3.4). Исследования проводились в том числе и с учётом розы ветров на исследуемой территории (рис. 3.7).

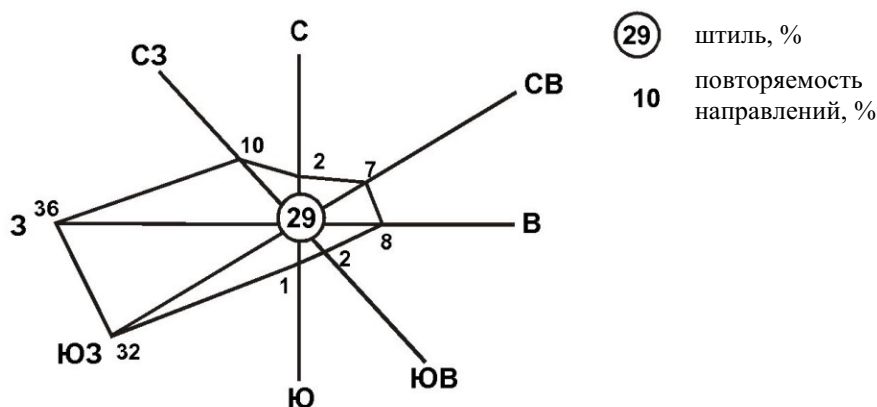


Рис. 3.7. Среднегодовая роза ветров района — зона наблюдения ФЯО ФГУП «Горно-химический комбинат»

При определении трития в атмосферных осадках (снег, дождь) пробы отбирались в конце марта, когда заканчивается основной зимний сезон, для чего на поверхности снега вымерялся квадрат размером 20×20 см. Проба снега изымалась на всю глубину, до поверхности грунта. Измерялась толщина снегового покрова. После отбора проба снега оттаивала при комнатной температуре до воды, затем фильтровалась через бумажный фильтр, далее — через мембранный ацетат-целлюлозный фильтр с диаметром пор 0,45 мкм. Измерялся общий полученный объём. Из усреднённой пробы отбиралась аликвота (10 мл), в которой определялось содержание трития.

Хвою и листья отбирали на строго вымеренной территории для расчёта вклада аэрозольного загрязнения на площадь исследуемой территории. После отбора опад перебирали для удаления посторонних предметов (сучья, галька и проч.), взвешивали. Для отгонки жидкой фракции из опадов использовалась установка, разработанная Л. Г. Бондаревой, с помощью которой отгонялась вся жидкость в виде азеотропной смеси с толуолом. Для устранения окраски выделенные жидкие пробы очищались трехкратной перегонкой с KMnO_4 в слабокислой среде.

Чтобы выявить возможное поступление трития в виде атмосферных осадков, проводили исследования снегового покрова, листового опада и хвои сосны, отобранных на различном удалении от ГХК. Результаты приведены в табл. 3.6.

Сезон отбора листового опада и сосновой хвои приходился на вторую половину сентября. Отбор проб снега осуществлялся в конце марта, когда

заканчивается основное выпадение осадков. Расчёты проводились на загрязнённую территорию, то есть беккерель на квадратный метр — для опада и беккерель на кубический метр — для снега. Тем самым полученные результаты дают наиболее презентабельную картину загрязнения территорий тритием и позволяют сделать расчёты на всю исследуемую территорию.

Таблица 3.6

Определение содержания трития в листовом опаде (Бк/м²),
сосновой хвое (Бк/м²) и снеговом покрове (Бк/м³)

Район отбора	Координаты	Дата отбора	
		2010 г.	2011 г.
Листовой опад			
пос. Березовка	56°07'43"N 93°13'09"E	3,5 ± 1,1	2,3 ± 1,3
с. Есаулово	56°14'86"N 93°27'52"E	2,7 ± 1,1	3,5 ± 1,2
с. Атаманово	56°39'94"N 93°61'86"E	6,1 ± 2,0	5,3 ± 1,1
дер. Б. Балчуг	56°45'72"N 93°71'06"E	11 ± 1	7 ± 1
с. Сухобузимское	56°50'65"N 93°30'55"E	5,2 ± 1,7	3,6 ± 2,1
дер. Усть-Кан	56°46'85"N 93°78'61"E	4,9 ± 1,5	3,8 ± 1,6
Хвоя сосны			
пос. Березовка	56°07'43"N 93°13'09"E	4,2 ± 0,5	3,9 ± 1,1
с. Есаулово	56°14'86"N 93°27'52"E	4,8 ± 0,8	4,2 ± 1,0
с. Атаманово	56°39'94"N 93°61'86"E	7,2 ± 0,7	5,3 ± 0,9
дер. Б. Балчуг	56°45'72"N 93°71'06"E	15 ± 1	8 ± 1
дер. Усть-Кан	56°46'85"N 93°78'61"E	8 ± 2	6 ± 1
Снеговой покров			
пос. Березовка	56°07'43"N 93°13'09"E	2 500 ± 24	2 400 ± 41
с. Есаулово	56°14'86"N 93°27'52"E	3 000 ± 28	3 200 ± 26
с. Атаманово	56°39'94"N 93°61'86"E	4 000 ± 16	3 900 ± 18
с. Сухобузимское	56°50'65"N 93°30'55"E	3 800 ± 44	4 100 ± 51
р. Большая Тель	56°43'04"N 93°70'05"E	15 000 ± 67	10 000 ± 46
дер. Б. Балчуг	56°45'72"N 93°71'06"E	13 000 ± 56	9 000 ± 39
дер. Усть-Кан	56°46'85"N 93°78'61"E	7 000 ± 31	6 000 ± 29

Представленные результаты показывают, что наиболее интенсивный перенос аэрозолей по наземной части осуществлялся в сторону реки Большая Тель и далее деревень Большой Балчуг, Усть Кан, что соответствует многолетним данным по розе ветров в среднем течении реки Енисей. Содержание трития во всех изучаемых объектах в несколько раз превышало значения для других районов исследования. Однако максимальные значения, обнаруженные на исследуемых территориях, не являются аномальными и находятся в пределах имеющихся данных по содержанию трития в атмосфере.

Что касается левобережных населённых пунктов, которые расположены вблизи от ГХК (сёла Атаманово и Сухобузимское), то в этом случае

незамерзающая зимой поверхность Енисея может рассматриваться как фильтр для аэрозолей, переносимых с территории ГХК.

Таким образом, тритий, переносимый в виде аэрозолей воздушными потоками, незначительно влияет на общее загрязнение исследуемых территорий радиоактивными веществами. Поэтому вклад переноса такого трития может не учитываться. Впервые получены данные по содержанию трития в снеговом покрове и опаде, которые отражают уровень загрязнения территории Красноярского края, расположенного в непосредственной близости от Горно-химического комбината ГК «Росатом».

1.5. Тритий и питьевая вода

В период 2008–2017 гг. проводились исследования на содержание трития в источниках питьевого водоснабжения (колодцы, колонки, водонапорные и водораспределительные установки, а также водопроводной воды в частных и многоквартирных домах) населённых пунктов, расположенных в зоне наблюдения ГХК (см. рис. 3.4).

Выявлено следующее. В колодцах населённых пунктов Большой Балчуг и Подпорог обнаружены концентрации трития в количестве 25 ± 5 и 17 ± 7 Бк/л соответственно, в других источниках питьевого водоснабжения они варьировались от 2,1 до 6,8 Бк/л.

Исходя из полученных результатов сделаны следующие заключения:

1. Деятельность ГХК практически не повлияла на уровень содержания трития в источниках питьевого водоснабжения, так как основные водозаборные станции являются подрусловыми реки Енисей.

2. Источником питания колодцев населённых пунктов, расположенных в левобережной части исследуемой территории, являются подземные водоносные горизонты, имеющие источник питания схожий с подрусловыми водами реки Енисей.

3. Незначительное превышение фонового содержания трития в колодцах деревень Большой Балчуг и Подпорог может иметь двойное происхождение — поступление с тальми водами с поверхности и смыв с наземной поверхности.

1.6. Накопление трития компонентами пресноводной экосистемы реки Енисей

Для выявления уровня содержания трития в биологических объектах изучались основные растения, произрастающие в пойме реки Енисей.

При выполнении работы собран большой объём биомассы различных гидробионтов Енисея — 15 видов водных, воздушно-водных растений и водорослей [Bondareva, 2011, 2018; Bondareva et al., 2015]. Некоторые виды погружённых гидрофитов, таких как рдест и элодея, были собраны почти на всех участках отбора проб от фонового района с. Есаулово до с. Стрелка (330 км от г. Красноярска), а также в районе г. Игарка (1760 км от Красноярска). Некоторые виды гидробионтов были собраны только на определённых участках реки. В лабораторных условиях пробы растений были разделены на виды и подготовлены к выделению трития.

Для определения содержания трития в растениях использовались наиболее распространённые виды, произрастающие в водах Енисея: *Elodea canadensis* Michx., *Potamogeton* L. После отбора их в лабораторных условиях перебирали, чтобы удалить другие виды, способные внести ошибку в исследуемую пробу. Тщательно промывали водопроводной проточной водой, после чего отбиралась общая навеска биомассы (30–80 г сырого веса) для выделения трития.

Тщательно промывали водопроводной проточной водой. После этого в некоторых видах растений отделялись листья, стебли, корневые части (калужница, рдест блестящий, элодея), а из остальных отбиралась общая навеска (30–80 г сырого веса) для выделения общего трития. Для определения органически связанного (необменного) трития растения высушивались при комнатной температуре, а потом досушивались в сушильном шкафу при температуре 45 °С в течение 48 часов. После высушивания растения измельчались в мельнице.

Для выделения органически связанного трития использовалась навеска 100–150 г сухого веса. Навеска подготовленных растений и филе рыбы помещалась в круглодонную колбу, где всё смешивалось с толуолом и выдерживалось в течение 8 часов при комнатной температуре.

Существенным отличием при дальнейшей подготовке проб к определению содержания трития являлось то, что существовала необходимость проведения дистилляции от 5 до 6 раз — до получения прозрачной жидкой пробы. Это связано с тем, что при отгонке азеотропной смеси из сухих проб биологических объектов выделяемая жидкая фракция интенсивно окрашена и содержит большое количество органических примесей (например, каротиноидов), которые либо образовались при нагревании смеси и выделились вместе с толуолом, либо присутствовали в исходных пробах.

Стандартные и фоновые пробы готовили одновременно с основными, чтобы свести к минимуму ошибку измерения. Время измерения исследуемых проб составляло 8–24 часов.

В табл. 3.7 приведены результаты определения содержания трития в наиболее распространённых видах растений. Из полученных данных следует, что содержание трития в выделенной поровой воде сырой массы растений для фонового района реки Енисей (с. Есаулово) варьирует от 4 до 7 Бк/л, что обусловлено в первую очередь физиологическими особенностями исследуемых видов растений, следовательно, и долей поровой воды в растениях, а также источником поступления питательных веществ к организму — вода или донные отложения.

Для района с. Атаманово (вблизи сброса реакторной воды ГХК) содержание трития в растениях и водорослях достигает значений (табл. 3.7), в несколько десятков раз превышающих фоновые значения (Бк/л). Максимальное содержание трития было зарегистрировано в биомассе зелёной нитчатой водоросли улотрикс, а также в листьях рдеста, сусака и элодеи.

Был проведён сравнительный анализ содержания трития в различных частях водных растений реки Енисей. Так, содержание трития в листьях рдеста в 2 раза превышает содержание трития в стеблях (табл. 3.8).

Аналогичная закономерность наблюдалась для листьев и стеблей элодеи. Это объясняется тем, что листья имеют большую площадь по сравнению с другими частями растений, следовательно, поверхность соприкосновения

с водным потоком у них значительно выше. Это, в свою очередь, ведёт к интенсивному обмену жидкостей, присутствующих в биомассе, с водой речного потока.

Таблица 3.7

Содержание трития в поровой воде сырой биомассы водных растений и водорослей реки Енисей (расстояние от г. Красноярска)

Вид растения	Содержание трития		Вид растения	Содержание трития	
	Бк/л	Бк/кг		Бк/л	Бк/кг
Игарка (1760 км)					
Элодея	< 3	< 2	Рдест	3 ± 1	1,5 ± 1
Стрелка (330 км)					
Элодея	< 3	< 1,2	Рдест	< 3	< 2
Захаровка (278 км)					
Элодея	4 ± 2	1,8 ± 1	Рдест	< 3	< 2
Большой Балчуг (101 км)					
Элодея	7 ± 3	3 ± 2	Рдест	6 ± 2	3 ± 1
Атаманово (87 км)					
Элодея	180 ± 13	82 ± 9	Рдест	54 ± 8	28 ± 7
Улотрикс	51 ± 5	38 ± 4	Мох водный	3 ± 1	1,4 ± 0,5
Есаулово (46 км)					
Мох водный	3 ± 1	1,4 ± 0,5	Рдест	4 ± 1	2 ± 1
Элодея	7 ± 2	3 ± 2	Лютик	7 ± 3	4,2 ± 1,8

Таблица 3.8

Содержание трития в частях водных растений, отобранных в районе с. Атаманово

Вид растения	Содержание трития			
	Бк/л		Бк/кг	
Элодея	120 ± 13 (лист)	54 ± 9 (стебель)	82 ± 10 (лист)	24 ± 5 (стебель)
Рдест	33 ± 13 (лист)	15 ± 7 (стебель)	18 ± 7 (лист)	10 ± 4 (стебель)

Таким образом, измеряя содержание трития в разных частях растения (лист, стебель) реки Енисей, сделано заключение об основном источнике поступления трития — это водный поток реки.

При сборе ихтиологического материала и его камеральной обработке руководствовались рекомендациями [Правдин, 1966; Лукьяненко, 1983]. В уловах

рыб по пунктам отбора на всех исследуемых участках определяли численность, видовой и размерный состав ихтиологического материала.

Наиболее распространённые и исследованные в работе виды рыб реки Енисей:

- осетры (*Acipenser*), стерлядь (*Acipenser ruthenus*), ленок (*Brachymystax*), ряпушка (*Coregonus sardinella*), омуль (*Coregonus autumnalis*), тугун (*Coregonus tugun*), чир (*Coregonus nasus*), сиг (*Coregonus*), нельма (*Senodus leucichthys nelma*), хариус (*Thymallus arcticus*), щука (*Esox Lucius Linnaeus*), карась серебряный (*Carassius auratus gibelio*), пескарь (*Gobio gobio cynocephalus*), елец (*Leuciscus leuciscus baicalensis*), плотва (*Rutilus rutilus lacustris*), сом (*Parasilurus asotus*), налим (*Lota lota*), окунь (*Perca fluviatilis*), ёрш (*Gymnocephalus cernuus*) и др. — определение тяжёлых металлов;

- хариус сибирский (*Thymallus arcticus*), сиг (*Coregonus*) и стерлядь (*Acipenser ruthenus*) — определение содержания трития.

Кроме того, был проведён единичный анализ содержания трития в мышечных тканях тугуна (*Coregonus tugun (Pallas)*) и карася серебряного (*Carassius auratus gibelio*) — для проведения модельных экспериментов по накоплению трития.

Проводились исследования по определению содержания трития в филе рыб*, выловленных в районах, отличающихся уровнем воздействия сбросов ГХК: выше по течению (40 км), в ближней зоне воздействия (0–15 км) и на значительном удалении от сбросов ГХК (1760 км) (табл. 3.9).

Таблица 3.9

Содержание трития в филе промысловых видов рыб, пойманных в реке Енисей в 2010–2012 гг. вблизи указанных населённых пунктов на разном удалении от Красноярска, Бк/кг сырого веса

Район отбора	Хариус			Сиг		Стерлядь	
	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2010 г.	2011 г.	2011 г.	2012 г.
с. Есаулово (46)*	12 ± 2	14 ± 3	13 ± 2	15 ± 3	13 ± 4	н. о.	н. о.
с. Атаманово (87)*	14 ± 1	11 ± 2	12 ± 3	14 ± 2	н. о.	н. о.	н. о.
с. Ярцево (685)*	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	16 ± 2
г. Игарка (1760)*	н. о.	13 ± 4	н. о.	н. о.	12 ± 4	15 ± 3	17 ± 3

* Расстояние от г. Красноярска, км.

Исследуемые виды промысловых рыб: хариус сибирский (*Thymallus arcticus*), сиг (*Coregonus sp.*) и стерлядь (*Acipenser ruthenus*). Кроме того, был проведён единичный анализ содержания трития в филе тугуна (*Coregonus tugun*), выловленного в районе с. Ярцево. Содержание трития в филе составило приблизительно 18 Бк/кг сырого веса (табл. 3.9).

На основе полученных результатов сделано заключение о том, что содержание трития в филе рыб не зависит от вида, типа питания, как и от района вылова особей. Основным источником поступления трития является вода и пища.

* Тушки взвешивались, затем из них отделялись мышечные ткани.

1.7. Содержание трития в пойменных почвах и донных отложениях реки Енисей. Накопление и удерживание трития

Как известно, тритий слабо аккумулируется в породообразующих структурах. Когда он проникает в грунты, процессы переноса такие же, как и у H_2O . Главные механизмы переноса трития в земное окружение включают основной поток, обусловленный градиентом гидравлического потока, и потоки, обусловленные градиентом испарения, температурным градиентом и градиентом концентрации НТО. Период полупревращения трития в грунтах и основном потоке длиннее, чем в других компонентах экологической системы. Относительно этого удлиняется период полупревращения трития в растениях, укоренённых в этом грунте. В связи с этим предполагается, что накопление трития, поступившего в водоём в результате смыва с загрязнённой поверхности почвы, донными отложениями, незначительно.

Для дополнительного обоснования и определения источника поступления трития в воду реки Большая Тель проводили отборы проб донных отложений, из которых была выделена и проанализирована поровая вода. Для сравнения были отобраны пробы донных отложений выше по течению от сбросов ГХК, в районе с. Есаулово, а также донные отложения в реке Енисей, в районе дер. Большой Балчуг. Полученные результаты показывают (табл. 3.10), что донные отложения, отобранные в районе дер. Б. Балчуг, содержат тритий и его содержание не превышает такового в фоновом районе.

Измерения проб поровой воды донных отложений и пойменных почв в реке Большая Тель показали повышенное содержание трития — до 25 Бк/кг (58 Бк/л). Кроме того, был обнаружен радионуклид ^{14}C — до 5,5 Бк/кг (14 Бк/л), вследствие чего было сделано предположение, что вероятным источником поступления трития в донные отложения реки Большая Тель служат подземные радиоактивные воды горизонтов полигона «Северный», которые, как известно, имеют гидрологическую связь с этой рекой, в пойму которой идёт частичная разгрузка.

Таким образом, донные отложения поймы реки Большая Тель содержат тритийсодержащую воду, поступающую посредством гидрологической связи с подземными водными горизонтами полигона «Северный», который разгружается в пойму реки Большая Тель.

Для дополнительного обоснования факта слабой аккумуляции трития и возможного переноса тритиевой воды через слои грунта были проведены модельные эксперименты. В качестве образцов грунтов использовались как донные отложения Енисея, так и другие породообразующие структуры (глина, песок — как в исходном состоянии, так и после термической обработки).

Для проведения экспериментов по миграции и удерживанию трития в слоях грунта исходные сухие образцы предварительно замачивались (5 сут) фильтрованной (фильтр 1 мкм) водой реки Енисей в следующих соотношениях:

- а) песок прокалённый (8 часов при t — 400 °С) — 450 г + 900 мл воды;
- б) глина прокалённая (8 часов при t — 400 °С) — 300 г + 600 мл воды;
- в) песок — 500 г + 1000 мл воды;
- г) глина — 450 г + 900 мл воды;
- д) донные отложения — 450 г + 900 мл воды.

Таблица 3.10

Водность и содержание радионуклидов ^3H и ^{14}C в пробах донных отложений и пойменных почвах

Район отбора	Глубина слоя, см	2001 г.			2002 г.	
		Водность, %	Содержание радионуклидов, Бк/кг		Водность, %	Содержание ^3H , Бк/кг
			^3H	^{14}C		
Река Енисей						
с. Есаулово	0–10	37	$1,5 \pm 0,4$	н. о.	38	$1,3 \pm 0,4$
д. Большой Балчуг	0–10	42	$1,7 \pm 0,8$	н. о.	41	$1,6 \pm 0,8$
Река Большая Тель						
Устье	0–10	43	20 ± 2	н. о.	н. о.	н. о.
50 м от устья	0–10	н. о.	н. о.	н. о.	43	21 ± 2
300 м от устья	0–10	39	19 ± 2 (14 ± 1)*	н. о. ($5,5 \pm 0,5$)*	38	25 ± 5
	10–20	н. о.	н. о.	н. о.	32	16 ± 2
500 м от устья	0–10	40	23 ± 2 (17 ± 2)*	н. о. ($0,6 \pm 0,4$)*	38	$4,1 \pm 0,7$
800 м от устья	0–10	41	10 ± 1	н. о.	н. о.	н. о.
1000 м от устья	0–10	44	9 ± 1	н. о.	н. о.	н. о.
Пойменная почва						
Между рекой Енисей и устьем реки Большая Тель	0–10	34	12 ± 2	н. о.	н. о.	н. о.
	10–20	26	$3,6 \pm 1,1$	н. о.	н. о.	н. о.

Примечание. н. о. — не определяли.

* Значения, полученные в МосНПО «Радон».

После замачивания излишки воды сливались из стаканов декантацией. Затем подготовленные пробы грунтов отбрасывались через бумажный фильтр. Объём отфильтрованной воды реки Енисей, используемой в эксперименте для прокачивания через колонку, — 5 л. Общее содержание внесённого трития составило 250 кБк (50 кБк/л).

Проведение эксперимента: собирали колонку, стенки которой состояли из полимерных материалов. Длина колонки — 70 см, внутренний диаметр — 10 см. Колонку заполняли слоями исследуемых геологических образцов, между которыми прослаивали «мельничные сита» с диаметром пор 1,5 мкм. Тритийсодержащую воду подавали в нижнюю часть колонки. Вода стекала естественным образом (самотёком) без использования насосов, по принципу сообщающихся сосудов с верхней частью колонки. Содержание трития, выходящего из колонки, определяли в объёме воды, стекающей с колонки за конкретный период времени. Отбор проб воды проводили через 12, 24, 48, 72, 96 и 168 часов. Для анализа отбирали из всего объёма аликвоту (8 мл), в которой измеряли содержание трития и после пересчитывали на объём, вышедший из колонки за фиксируемый промежуток времени. Через 6 суток эксперимент был завершён, и из колонки лишняя жидкость была удалена самопроизвольным стеканием. Колонка была разобрана, а образцы грунтов разделены. Из каждого образца была взята навеска для отгонки поровой жидкости и определения в ней общего содержания трития. Для определения необменного трития часть пробы промывали дистиллированной водой, излишняя вода стекала с пробы. Подготовленную таким образом пробу помещали в отгонную колбу для последующего выделения жидкости, в которой определяли содержание трития.

Для расчёта коэффициента распределения (K_D) и удерживающего фактора R использовали следующие формулы [Bondareva, 2018]:

а) коэффициент распределения:

$$K_D = \left(\frac{A_0 - A}{A} \right) \cdot \frac{V}{m}, \text{ мл/г,}$$

где A_0 и A — исходная и конечная активность трития в жидкой фазе, Бк соответственно; V — объём жидкой фазы (объём поровой жидкости), мл; m — масса почвы, г;

б) удерживающий фактор R (безразмерная):

$$R = 1 + \frac{\rho}{\eta} \cdot K_D,$$

где ρ — плотность геологического материала, г/см³; η — пористость геологического материала, см³/г.

Термическую обработку использовали для удаления присутствующих в грунтах органических веществ. Контроль стекающей на выходе из колонны жидкости показал, что через 48 часов от начала и на протяжении всего оставшегося времени эксперимента содержание трития мало отличается от такового на входе в колонку (рис. 3.8). Это подтвердило сделанное ранее предположение о том, что тритий слабо удерживается грунтом и может мигрировать в восходящем вертикальном потоке со значительной глубины.

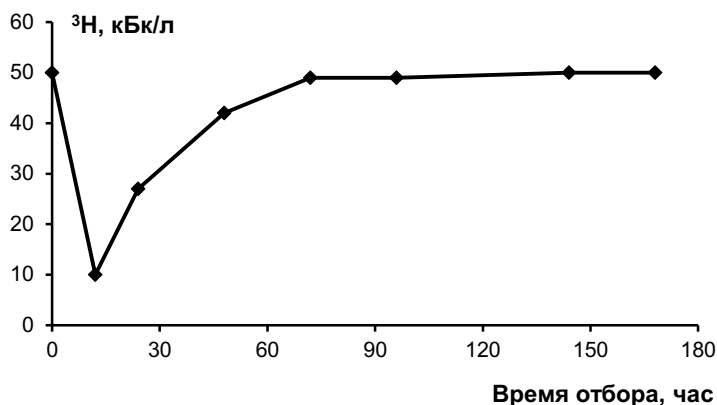


Рис. 3.8. Содержание трития в стекающей из экспериментальной колонны воде

Определение коллекторских свойств проб донных отложений проводили согласно ГОСТу 26450.1-85 (табл. 3.11).

Таблица 3.11

Содержание поровой жидкости и водоотдача проб грунта, используемых в эксперименте

№ п/п	Вид грунта	Масса, г (естественно-влажный грунт)	Объём воды, мл	Водоотдача, %
1	Песок прокалённый	339	30,5	9
2	Песок	324	32	10
3	Глина прокалённая	299	40	12
4	Глина	345	69	20
5	Донные отложения	363	131	36

Как видно из представленных данных, меньше всего водоотдача у песка прокалённого, а больше всего — у донных отложений, что связано с их геохимическими свойствами.

Для выяснения причины слабого удерживания трития из части исследуемых проб грунтов выделили поровую жидкость и определили в ней его общее содержание. Другую часть проб грунтов промыли дистиллированной водой для удаления обменной тритиевой воды, затем промытые пробы после стекания излишней влаги также были подвержены азеотропной отгонке — для выделения трития, связанного в необменные формы.

Результаты определения содержания общего и необменного трития в каждой пробе грунта приведены в табл. 3.12. Как видно из них, общее содержание трития в грунтах варьируется в значительном интервале от 7,98 (для песка) до 21,1 кБк/л (для донных отложений). Такое изменение весьма закономерно и зависит, главным образом, от геохимических параметров используемых проб грунтов (табл. 3.12).

Таблица 3.12

Содержание общего и необменного трития в исследуемых пробах грунта

Проба	Общий тритий		Необменный тритий	
	Бк/л	Бк/кг	Бк/л	Бк/кг
Песок прокалённый	7 980 ± 120	720 ± 11	< МДА	< МДА
Песок	14 100 ± 133	1410 ± 33	< МДА	< МДА
Глина прокалённая	10 800 ± 138	1300 ± 53	280 ± 20	34 ± 4
Глина	15 100 ± 161	3030 ± 32	250 ± 15	50 ± 3
Донные отложения	21 100 ± 585	7600 ± 210	950 ± 13	340 ± 24

При определении содержания трития в пробах после их промывания дистиллированной водой тритий был обнаружен в пробах глины (исходной и прокалённой — 250 и 280 Бк/л соответственно) и донных отложений (950 Бк/л). Это может быть связано с тем, что в донных отложениях происходит связывание части трития (~ 4,5 %) с органическими веществами, покрывающими поверхности частиц донных отложений, при этом образуется необменный тритий, тогда как большая часть трития взаимодействует в результате адгезии и образования водородных связей с молекулами, также присутствующими на поверхности частиц. Для глины характерно проникновение молекул, ионов определённого размера в слои глинистых структур, при этом происходит удерживание дипольных тритийсодержащих молекул воды в электростатическом поле минерала. И такой тритий мы можем отнести к необменному тритию, так как его практически невозможно удалить путём простого промывания дистиллированной водой. Доля необменного трития составила примерно 2,6 и 1,7 % для прокалённой и исходной глины соответственно.

В табл. 3.13 приведены результаты определения плотности (ρ), пористости (η) и расчетов коэффициента распределения (K_D) и удерживающего фактора (R) трития в исследуемых пробах.

Таким образом, доказано, что геологические породы различного генезиса могут лишь незначительно удерживать тритий. Это связано как с физико-химическими свойствами трития, присутствующего в окружающей среде в основном в виде НТО, так и с геохимическими параметрами геологических структур.

Значения удерживающего фактора и коэффициента распределения максимальные для донных отложений и составляют 0,69 и 2,57 для R и K_D соответственно. Это полностью коррелирует результатам содержания трития в необменной форме.

Кроме того, значения коэффициента распределения отличны от единицы, что можно объяснить как процессами разбавления вносимой тритийсодержащей воды водой, присутствующей в исследуемых пробах, так и различной скоростью миграции H_2O и долей НТО, присутствующей в объёме воды.

Таблица 3.13

Определение плотности (ρ) и пористости (η), расчёт коэффициента распределения (K_D) и удерживающего фактора (R) трития в исследуемых пробах грунта

Тип грунта	ρ , г/см ³	η , см ³ /см ³	R	K_D
Песок прокалённый	1,5	1,0	1,41	0,27
Песок	1,5	1,1	1,34	0,25
Глина прокалённая	1,6	1,1	1,69	0,48
Глина	1,5	1,2	1,58	0,46
Донные отложения	1,4	1,2	2,57	0,69

С помощью геохимических параметров мы можем описать процессы, протекающие в толще грунта, результатом которых является вынос веществ различного происхождения на поверхность почвы и в поверхностные водоёмы. Тем самым могут создаваться негативные последствия для окружающей среды.

Таким образом, геологические породы различного генезиса могут лишь незначительно удерживать тритий, что связано как с физико-химическими свойствами трития, присутствующего в окружающей среде преимущественно в виде НТО, так и с геохимическими параметрами геологических структур.

Глава 2. Республика Саха (Якутия)

2.1. Подземные ядерные взрывы

Воздействие ядерных технологий на окружающую среду, разное по типу и масштабам, объединено под термином «ядерный техногенез». К этому виду техногенеза относятся и мирные подземные ядерные взрывы — разовое применение ядерной энергии в недрах Земли. Это одно из самых сильных техногенных воздействий, когда-либо оказанных человеком на геологическую среду [Адушкин, Спивак, 2007].

Государственная программа СССР № 7 «Ядерные взрывы для народного хозяйства» была начата 15 января 1965 г. взрывом «Чаган» на Семипалатинском испытательном полигоне мощностью 140 кт в тротиловом эквиваленте (ТЭ) для создания водохранилища. В рамках этой программы было проведено всего 124 ПЯВ с использованием 135 ядерных взрывных устройств общей мощностью 1,6 Мт в ТЭ [Мирные ядерные..., 2001].

Назначение этих взрывов было самое разнообразное: 39 были проведены в качестве источников волн для глубинного сейсмозондирования по заказу Министерства геологии СССР по ряду профилей, проложенных через всю страну (рис. 3.9); 41 — для создания подземных емкостей и хранилищ; 21 — для интенсификации добычи нефти и газа; 6 — для экскавационных экспериментов; 5 — для ликвидации аварийных газовых фонтанов; 4 — для образования

провальных воронок; 4 — для захоронения вредных промышленных стоков и радиоактивных отходов; 2 — для дробления руды при её подземной добыче; по 1 — для предупреждения внезапных выбросов угольной пыли и метана на угольных шахтах и для создания плотины хвостохранилища путём рыхления породы.



Рис. 3.9. Географическое расположение ПЯВ, проведённых на территории СССР в 1965–1988 гг. Пунктирные линии — некоторые из геофизических профилей, образованных сериями ПЯВ в качестве источника для сейсмозондирования земли [Мирные ядерные..., 2001]

По 8 и более подземных ядерных взрывов были проведены в 1972, 1982–1984 гг. (рис. 3.10). Последний ПЯВ «Рубин-1» мощностью 8,5 кт в ТЭ проведён 6 сентября 1988 г. для сейсмозондирования Земли.

Для взрывов обычно бурили специальные скважины широкого диаметра, так называемые боевые скважины, и только для нескольких были использованы штольни. На определённом уровне ствола боевой скважины подвешивали ядерное взрывное устройство, затем на нескольких интервалах ствола боевой скважины устанавливали цементные пробки, остальное пространство ствола заполняли разным материалом в соответствии проектным заданием, чаще использовали обломочную горную породу (песок, щебень) и (или) воду (рис. 3.11).

В зависимости от приведённой глубины и мощности взрыва различают четыре вида подземных ядерных взрывов:

- 1) камуфлетные;
- 2) неполного камуфлета;
- 3) рыхления;
- 4) экскавационные (на выброс).

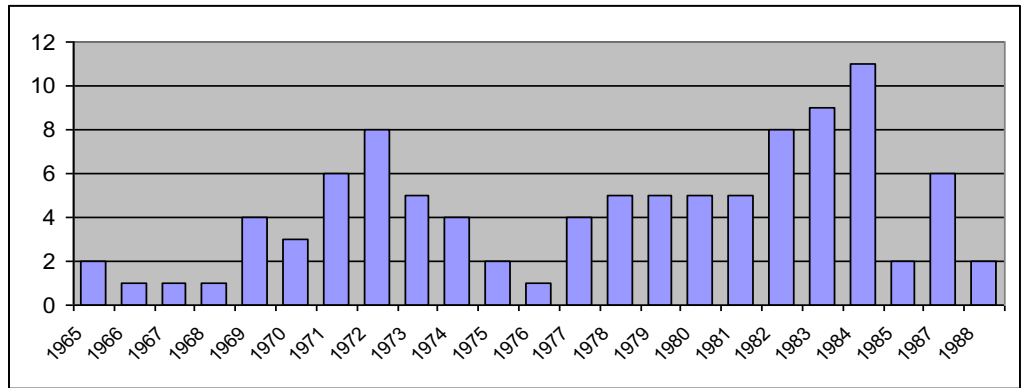


Рис. 3.10. Распределение проведённых в СССР ПЯВ народнохозяйственного назначения по годам [Мирные взрывы..., 2001]

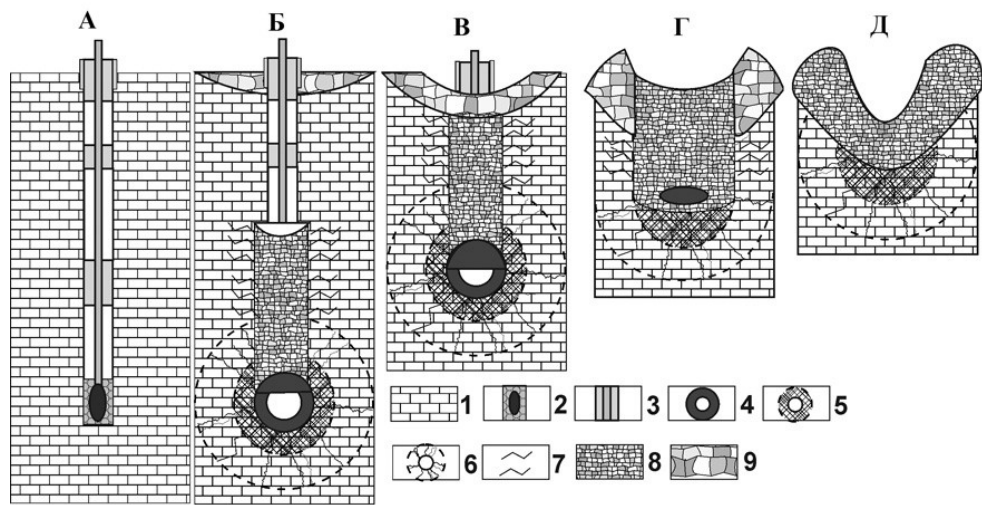


Рис. 3.11. Схема боевой скважины (А), виды ПЯВ: камуфлетный (Б), неполный камуфлетный (В), на рыхление (Г), на выброс (экскавационный) (Д).
 Условные обозначения: 1 — вмещающие горные породы; 2 — завеска ЯВУ в боевой скважине; 3 — герметизация скважины цементными пробками; 4 — полость взрыва, окружённая расплавленной породой; 5 — зона дробления; 6 — зона трещиноватости; 7 — трещины, примыкающие к столбу обрушения; 8 — столб обрушения; 9 — зона откола у поверхности земли

Камуфлетный взрыв — взрыв полного внутреннего действия, без нарушений на поверхности земли и выхода активности на поверхность земли. Вследствие расплавления и испарения пород в центральной зоне взрыва формируется полость взрыва, а вокруг неё — зоны механического разрушения горных пород. Полость ограничена сферой сгущения и оплавления пород в виде тонкой «корки», за которыми следуют зоны дробления, далее — зона трещиноватости, образующиеся в первой стадии взрыва (от микросекунды до десятков миллисекунд в зависимости от прочности вмещающих горных пород и мощности взрыва). Зона откола образуется (сотни миллисекунд) при отражении волны

сжатия от плоской свободной поверхности на границе *литосфера-атмосфера* и имеет форму шарового сегмента. Столб обрушения (секунды-часы) образуется при обрушении полости в результате так называемого процесса «всплытия» полости. Экспериментально выявлено, что минимальная приведённая глубина, необходимая для обеспечения камуфлетности взрыва, должна быть равна 80–95 м/кт^{1/3} в зависимости от типа вмещающих пород [Адушкин, Спивак, 2007].

По мере уменьшения приведённой глубины развивается промежуточный взрыв *неполного камуфлета*. При малоглубинном взрыве на *рыхление* (см. рис. 3.11, Г) столб обрушения достигает поверхности земли, массив пород выше центра взрыва подвергается перемещению, создавая холмы вспучивания и (или) провальные воронки в зависимости от исходных физико-химических свойств горных пород, полость взрыва разрушается, но не вскрывается, происходит штатное истечение котлового газа (1–4 % от общей активности). Для переформирования рельефа проводили взрывы на выброс или экскавационные, при которых завеска ЯВУ была близповерхностной, и в результате происходило вскрытие полости взрыва (см. рис. 3.11, Д).

В Якутии в период с 1974 по 1987 гг. было проведено 12 подземных ядерных взрывов, которые в дополнение к глобальным выпадениям стали основными поставщиками трития в природную среду региона (рис. 3.12, табл. 3.14), поскольку других источников трития в Якутии нет, так как здесь нет предприятий атомной промышленности. Все 12 взрывов были проведены на безгорной части Якутии, относящейся к Сибирской платформе (рис. 3.13). Два взрыва: «Кристалл» и «Кратон-3» — отнесены к аварийным. При взрыве «Кратон-3» через устье боевой скважины произошёл выход продуктов взрыва, по следу образовавшегося радиоактивного облака приведший к гибели близлежащего лесного массива.

При ядерных взрывах образуется широкий спектр радиоактивных изотопов:

- осколки вынужденного деления тяжёлых делящихся материалов первоначально представлены 80 изотопами 35 химических элементов от Zn до Gd;
- радионуклиды, образовавшиеся в результате взаимодействия нейтронов с материалами вмещающей геологической среды и инженерных конструкций (³H, ⁶⁰Co и др., так называемая наведённая активность).

Кроме того, остаются: 1) несгоревшие остатки делящихся (²³⁹Pu, ²³⁵U), 2) термоядерных (³H) материалов и 3) радионуклиды (²³⁸Pu, ²³⁸U), используемые в конструкции ЯВУ [Мирные ядерные..., 2001; О критериях отнесения..., 2012]. В течение первого года после взрыва основная масса короткоживущих изотопов наведённой и осколочной активности распадается. Далее длительный период (до 100 лет после взрыва) одним из основных вкладчиков общей активности является именно ³H и только потом осколочные ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, изотопы Pu и продукт распада изотопа плутония — ²⁴¹Am, количество которого со временем растёт.

Центральную зону взрыва (ЦЗВ) нужно рассматривать как подземный пункт размещения в геологической среде особых радиоактивных отходов без защитных барьеров [О критериях отнесения..., 2012]. Поскольку ЦЗВ ПЯВ не изолирована от вмещающей геологической среды, существует вероятность переноса радионуклидов из ЦЗВ, как и возможна их миграция в геологической среде вплоть до выхода на дневную поверхность, особенно при изменении состояния недр (например, при эксплуатации недр прилегающей территории).

Таблица 3.14

Основные параметры объектов ПЯВ в Якутии

№ п/п	Дата	Название объекта	Назначение	Мощность, кт в ТЭ	Глубина, м
1	02.10.1974	«Кристалл»*	Создание навала для строительства плотины хвостохранилища	1,7	98
2	05.11.1976	«Горизонт»	Источник волн для глубинного сейсмозондирования	7,6	483
3	05.11.1976	«Ока», скв. 42	Повышение нефтеотдачи продуктивного горизонта	15	1520
4	09.08.1978	«Кратон-4»	Источник волн для глубинного сейсмозондирования	22	574
5	24.08.1978	«Кратон-3»*	То же	22	577
6	08.10.1978	«Вятка», скв. 43	Повышение нефтеотдачи продуктивного горизонта	15	1529
7	08.10.1979	«Шексна», скв. 47	Повышение интенсивности притока газа	15	1541
8	12.08.1979	«Кимберлит», скв. КМ-4	Источник волн для глубинного сейсмозондирования ГСЗ	8,5	986
9	10.10.1982	«Нева-1», скв. 66	Повышение нефтеотдачи продуктивного горизонта и интенсивности притока газа	15	1501
10	07.07.1987	«Нева-2», скв. 68	То же	15	1527
11	24.07.1987	«Нева-3», скв. 61	То же	15	1515
12	12.08.1987	«Нева-4», скв. 101	Создание ёмкости для хранения углеводородного сырья	3,2	815

* Объекты ПЯВ отнесены к категории аварийных [Мирные ядерные..., 2001].



Рис. 3.12. Схема расположения объектов ПЯВ в Якутии (нумерация объектов ПЯВ совпадает с нумерацией в табл. 3.14)



Рис. 3.13. Положение 12 объектов ПЯВ проведённых на Сибирской платформе (СБНГКМ — Среднеботубинское нефтегазоконденсатное месторождение)

Известно, что в поверхностных условиях тритий находится по преимуществу в форме тритиевой воды $^3\text{H}_2\text{O}$ [Рихванов, 2009]. Тритий, в силу своей высокой способности к водной миграции, может служить индикатором существующих путей массопереноса в геологической среде и степени геоизолированности центральной зоны взрыва. Изучение его распространения в водах (подземных и поверхностных) также актуально из-за рисков для здоровья населения, которые обусловлены излучающими свойствами трития и его способностью связываться с органическими соединениями.

2.2. Фоновый уровень трития в поверхностных водах Якутии

Начиная с 2005 г. ведётся постоянный мониторинг активности трития в речной воде по трем гидропостам в реках Колыма, Индигирка, дельте реки Лена и атмосферных осадках на четырёх метеостанциях (Верхоянск, Оленек, Тикси, Якутск), при котором аналитические работы проводятся в радиохимической лаборатории НПО «Тайфун» Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды РФ [Радиационная обстановка..., 2017].

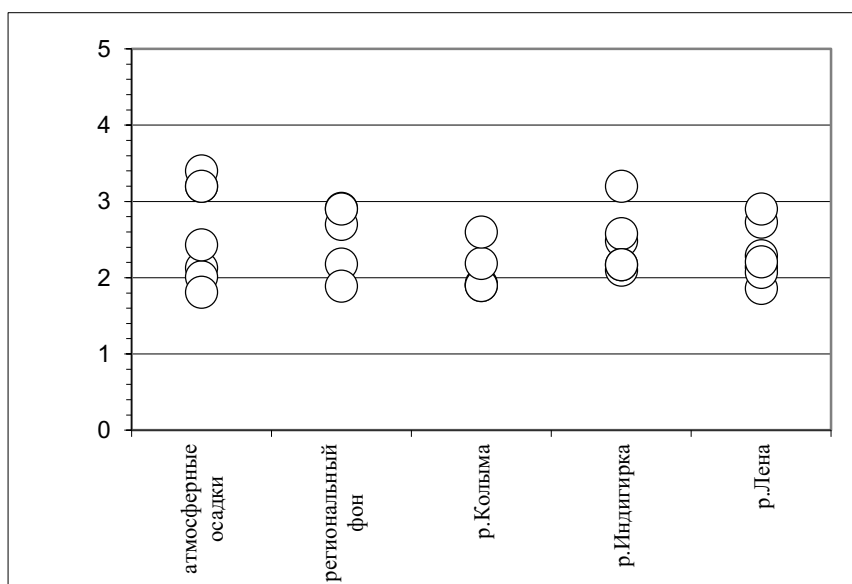


Рис. 3.14. Активность трития в реках Колыма, Индигирка, Лена, средняя активность трития в речной воде и атмосферных осадках в 2012–2014 гг.

Реки Колыма и Индигирка расположены в восточной части Якутии, вдали от объектов ПЯВ, активность трития в них практически одинакова. Многоводность реки Лена, по-видимому, сводит на нет возможное влияние объекта ПЯВ «Горизонт», расположенного в её низовье, поскольку активность трития в дельте реки также сравнима с таковой в Индигирке и Колыме (рис. 3.14). Например, средняя активность трития в этих реках составила, Бк/дм³: в 2002 г. — 2,9, 3,2, 2,6; в 2014 г. — 2,2, 2,3, 2,0 соответственно [Государственный доклад..., 2003, 2015]. Средняя активность трития в этих реках принята нами за региональный

фоновый уровень трития в речной воде и, по данным 2020 г., оценивается в $1,89 \text{ Бк/дм}^3$ [Государственный доклад..., 2021].

В зоне сплошной многолетней мерзлоты питание северных рек Якутии обеспечивается главным образом за счёт талых вод и атмосферных осадков, доля грунтовых и подземных вод в их питании очень мала. Следовательно, активность трития в фоновой речной воде Якутии (вдали от районов ПЯВ), как и в реках Индигирка, Колыма и многих других, формируется в основном за счёт трития, выпадающего с атмосферными осадками, поскольку последний в талых водах в целом является всё тем же атмосферным тритием, выпавшим со снегом и накопленным за зиму в снежном покрове. Содержание трития в фоновой речной воде и атмосферных осадках весьма близко между собой, это указывает на то, что в настоящее время уже нет значимого смыва трития, выпавшего на местные ландшафты в период ядерных испытаний (рис. 3.14).

По литературным данным, фоновое содержание трития в атмосферных осадках на территории России в 2011 г. оценивалось в пределах $1,44\text{--}3,0 \text{ Бк/дм}^3$ [Поляков, Пятницкий, 2011]. С ними согласуются показатели средней активности трития в атмосферных осадках в Якутии по данным метеостанций Верхоянск, Оленёк, Тикси, Якутск — $2,13\text{--}2,43 \text{ Бк/дм}^3$ (рис. 3.14). До ядерных испытаний в атмосферных осадках и поверхностных водах естественное содержание трития в дождевой воде формировалось только из космогенного трития, и оно колебалось от 0,5 до 4 ТЕ или $0,06\text{--}0,48 \text{ Бк/дм}^3$ при ТЕ $0,12 \text{ Бк/дм}^3$ [Ливанцова, Снакин, 2014]. В период ядерных испытаний в атмосферу поступило значительное количество трития. В настоящее время доля природного космогенного трития в атмосферных осадках очень мала — от первых процентов до примерно 25 %, основную часть трития, циркулирующего в атмосфере-гидросфере, составляют остатки трития, поступившего в период ядерных испытаний и крупных аварий на АЭС, также определённая доля трития постоянно поступает со сбросами и выбросами штатно работающих объектов атомной промышленности [Ливанцова, Снакин, 2014].

2.3. Тритий в районе подземного ядерного взрыва «Кристалл»

Краткая характеристика объекта ПЯВ «Кристалл». Первый в Якутии ПЯВ «Кристалл» мощностью 1,7 кт в тротиловом эквиваленте был произведён 2 октября 1974 г. в 6,7 км к северо-востоку от г. Удачный (рис. 3.15, 3.16) в многолетнемерзлых породах на глубине 98 м. Это был первый из восьми запланированных малоглубинных взрывов на вспучивание по линейному ряду поперёк долины ручья Улахан-Бысыттах (левого притока реки Далдын) для строительства плотины хвостохранилища длиной 1800 м, шириной по гребню 85 м, высотой 27–30 м.

Купол выброса грунта при взрыве на 4-й секунде достиг максимальной высоты в 60 м, что было примерно на 30 % выше расчётной, и упал без раскрытия. Карбонатный состав пород с высокой газовостью усилил процесс откола пород. В период с 6,2 до 12,5 с произошёл штатный прорыв базисной волны.

Из-за малой глубины взрыва в 98 м обрушение пород и зона откола образовали массив раздроблённых и колотых пород от центра взрыва к поверхности земли в форме перевернутого конуса, основанием которого на поверхности стал навал

грунта диаметром примерно 200 м высотой по гребню 10–14 м. По центру навала был образован провал диаметром почти 100 м, его высота оказалась более чем в 2 раза меньше расчётной, что стало официальной причиной для отказа от последующих семи взрывов (позднее хвостохранилище было построено обычным способом).



Рис. 3.15. Кадр из киносъёмки ПЯВ «Кристалл» (примерно 4,5 с после начала взрыва, купол уже падает) [Бурцев, Колодезникова, 1997]

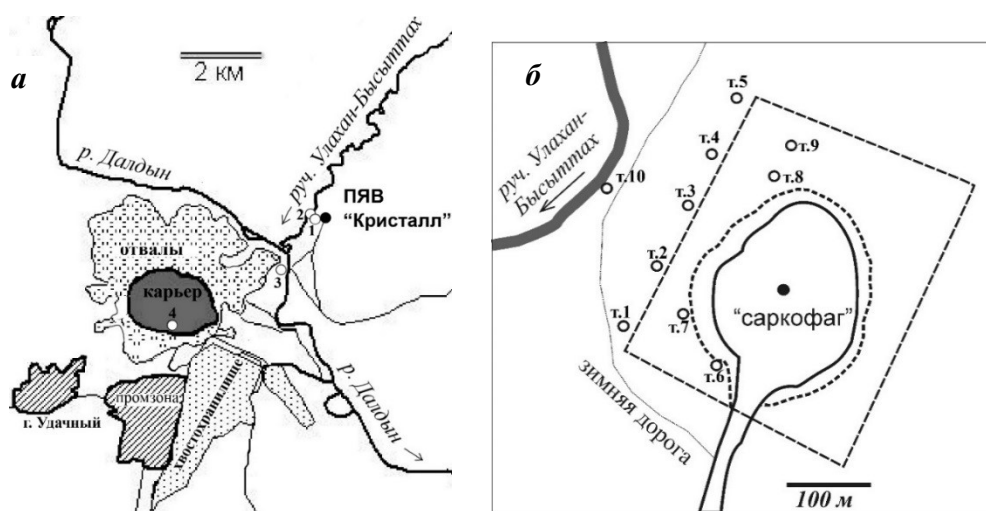


Рис. 3.16. Расположение объекта ПЯВ «Кристалл» в алмазодобывающем районе у кимберлитовой трубки «Удачная»: участки отбора проб (а); точки пробоотбора на технологической площадке (б)

При первом посещении после снятия секретности объекта ПЯВ «Кристалл» в 1990 г. на эпицентре взрыва наблюдался навал с провалом по центру, где было сформировано озеро диаметром около 60 м. В 1992 г. навал засыпали обломочным материалом, привезённым из отвалов пустой породы карьера кимберлитовой трубки «Удачная». В 2006 г. насыпь нарастили путём дополнительной досыпки с восточной и северной стороны, в результате был создан так называемый «саркофаг» высотой до 20 м площадью 5,25 га (рис. 3.17).



Рис. 3.17. Глыбово-щебнистая насыпь, перекрывающая навал, возникший на эпицентре взрыва «Кристалл». Подъездная дорога примыкает к южной стороне насыпи. На переднем плане ручей Улахан-Бысыттах. Фотография сделана с вертолѐта в 2007 г. (автор Захаров В. Е.)

Краткая характеристика вмещающей геологической среды. Геологическая среда сложена из кембрийских терригенно-карбонатных пород общей мощностью около 2200 м, согласно перекрывающих маломощные (до 190 м) доломиты эдиакария, которые несогласно залегают на кристаллическом фундаменте архея. Отложения представлены в основном известняками и доломитами и их глинистыми, мергелистыми разностями горизонтального или моноклиналиного залегания с падением в юго-западном направлении до 10–12°. Эти отложения накапливались в условиях мелководного моря и представлены преимущественно известняками и доломитами и их глинистыми, мергелистыми разностями. Кембрийские породы согласно перекрывают маломощные (до 190 м) доломиты эдиакария, несогласно залегающие на кристаллическом фундаменте архея (рис. 3.18). Осадочная толща прорвана кимберлитовыми трубками, одна из них — двойная трубка «Удачная».

Верхнюю часть разреза мощностью 100–300 м слагают многолетнемерзлые породы, вода в них находится в виде льда. Ниже залегают *охлаждённые породы* (содержат высокоминерализованные подземные воды с отрицательной температурой (криопэги)) и *морозные породы* — с отрицательной температурой и сухие. Изотерма (0 °С) залегает на глубине 800–1050 м [Климовский, Готовцев, 1994]. Выделяют пять водоносных комплексов, насыщенных подземными рассолами.

Подземные водоносные комплексы района представляют собой напорную систему, в которой обособляются верхнекембрийский, I среднекембрийский комплексы, содержащие криопэги, ниже II среднекембрийский, нижнекембрийский и верхнепротерозойский водоносные комплексы, насыщенные рассолами. С глубиной растёт минерализация подземных рассолов от 90 до 480 г/дм³ и содержание в них кальция, превышение пластового давления над нормальным гидростатическим изменяется от 1–1,5 до 26 МПа [Климовский, Готовцев, 1994, Алексеев, 2009].

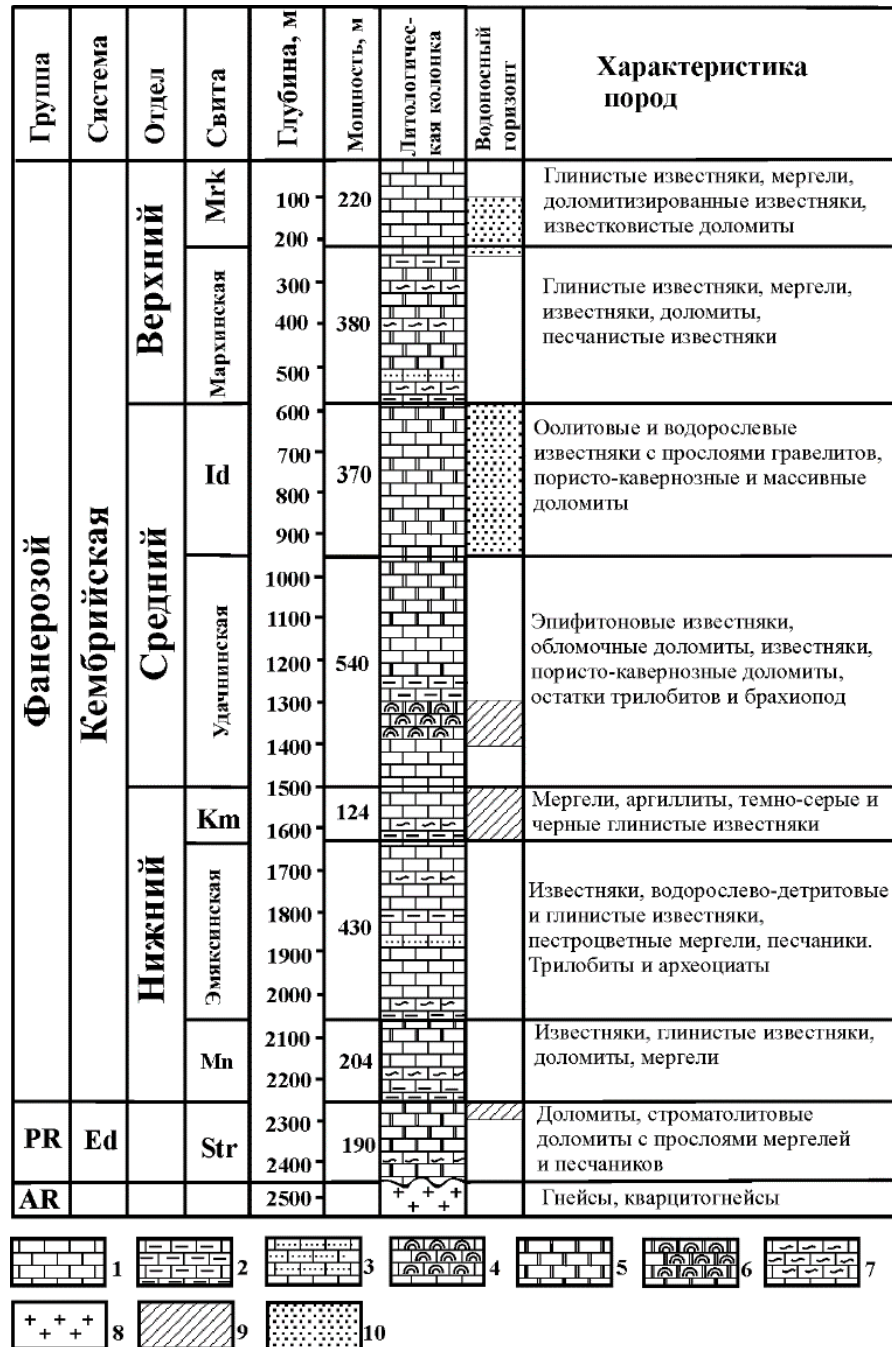


Рис. 3.18. Литологическая колонка (с уровнями распространения подземных водоносных горизонтов) района ПЯВ «Кристалл» по данным скв. 703, глубина 2593 м [Алексеев, 2009]: 1–4 — известняки: 1 — чистые, 2 — глинистые, 3 — песчанистые, 4 — органогенные; 5–6 — доломиты чистые (5), органогенные (6); 7 — мергели; 8 — кристаллические породы фундамента; 9 — протерозойский, нижнекембрийский и II среднекембрийский водоносные горизонты; 10 — I среднекембрийский и верхнекембрийский водоносные горизонты. Свиты: str — старореченская; mn — манькайская; km — куонамская; id — известняково-доломитовая пачка, mrk — маркокинская. Ed — эдиакарий

Верхнекембрийский водоносный комплекс трещинно-порового типа распространён в тонких трещиноватых глинистых известняках маркокинской и верхней части мархинской свиты на глубинах от + 100 до + 180 м абс. с общей мощностью от 2–3 до 10–30 м. Минерализация вод изменяется от 30 до 200 г/дм³ при среднем значении 90 г/дм³.

Кровля *I среднекембрийского водоносного комплекса*, приуроченного к известняково-доломитовой пачке, вскрывается на глубине от –300 до –600 абс. м, средняя мощность — приблизительно 250 м, минерализация вод — до 300 г/дм³. Тип коллекторов — кавернозно-поровый. При плотности рассолов приблизительно 1,22 г/см³ и пластовых давлениях 4,5–9 мПа [Алексеев, 2009] напор над кровлей составляет от 360 до 730 м. Водоупорами снизу являются плотные доломиты удачининской свиты, а сверху — глинистые известняки мархинской свиты.

II горизонт приурочен к зонам биогерм на глубинах от –1000 до –1120 абс. м, напор над кровлей, по разным данным, 310–350 м [Микуленко и др., 2006] и примерно 565, местами — до 1270 м [Алексеев, 2009]. Характерны рассолы с минерализацией 400–450 г/дм³. Тип коллекторов — преимущественно кавернозно-поровый.

Нижнекембрийский водоносный комплекс вскрыт на глубине от –1390 до –1537 абс. м в трещиноватых плотных известняках и доломитах куонамской свиты, тип коллектора — трещинный. Комплекс отличает высокая водообильность, напор над кровлей — 1200–1335 м, минерализация — до 480 г/дм³ [Микуленко и др., 2006].

Кровля *верхнепротерозойского водоносного комплекса* приурочена к верхней части старореченской свиты на глубине примерно –2260...–2300 абс. м, минерализация рассолов — выше 400 г/дм³, напор над кровлей — 1650–2100 м [Алексеев, 2009]. Напор подземных вод увеличивается с глубиной, по горизонтали — к центру Тунгусской синеклизы.

Скважиной ПЯВ «Кристалл» вскрыта малая толика геологического разреза района: в интервале 0–5 м вскрыты четвертичные отложения (суглинки, гравий, галечник, щебень). Ниже располагаются породы маркокинской свиты: 5–9,8 м — мергель трещиноватый; 9,8–21,5 м — известняк слаботрещиноватый; 21,5–105,3 м — переслаивание доломитизированных и трещиноватых глинистых известняков, в которых (на глубине 98 м) и был произведён взрыв.

Активность трития в поверхностных водах района ПЯВ «Кристалл». По прошествии десятков лет после ПЯВ «Кристалл» тритий остаётся одним из основных индикаторов распространения радионуклидов в геотехногенной системе «полость ПЯВ — вмещающая геологическая среда — поверхность Земли» в силу его высокой водной подвижности. Тот факт, что для получения количественных данных активности трития требуется совсем небольшой объём пробы (200–500 см³), а также относительная простота лабораторной подготовки и последующих измерений (по сравнению с ⁹⁰Sr, ^{239,240}Pu) обуславливают приоритетность изучения содержания трития для оценки радиэкологической обстановки в районах ПЯВ.

Площадка объекта ПЯВ «Кристалл» в радиусе примерно 200 м вокруг боевой скважины представляет собой ослабленную флюидопроницаемую зону. Здесь первую очередь отбиралась вода из ручья, вытекающего из-под западного склона насыпи-саркофага (точки 6–7 на рис. 3.16, б). К северу от насыпи площадка заболочена, где в разные годы наблюдались мелкие ручейки (т. 8, 9 на рис. 3.16). В 40–50 м ниже по склону от саркофага сформированы небольшие

водопроявления в виде луж, в которых также проводился отбор проб. Рядом с ними в 2006 г. были пробурены пять наблюдательных скважин на глубину около 2 м, в которых можно отобрать грунтовые воды сезонно-талого слоя.

Известно, что в 2002 г. активность трития в ручье, вытекающем из-под насыпи ПЯВ «Кристалл», составила 221 Бк/дм³ [Голубов и др., 2004]. Наши исследования показали, что максимальная активность трития на площадке ПЯВ «Кристалл» наблюдается именно в этом ручье, Бк/дм³: 2008 г. — 27; 2012 г. — 18; 2018 г. — 12 (рис. 3.19). В мелких ручейках также выявлено снижение активности трития, Бк/дм³: 2002 г. — 26,4 [Голубов и др., 2004], 2012 г. — всего 4 и 5.

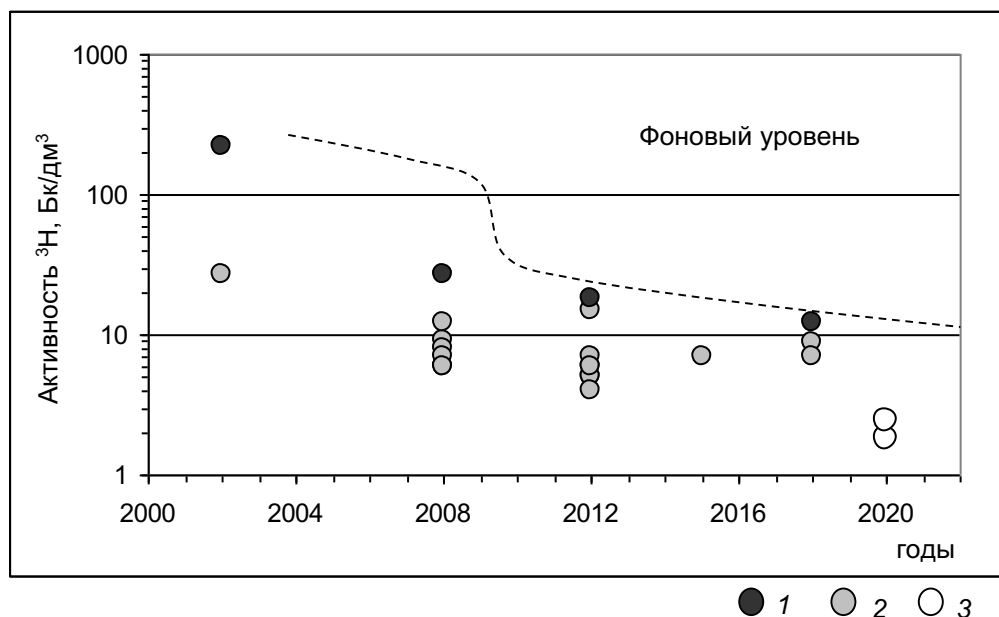


Рис. 3.19. Объёмная активность трития в поверхностной воде площадки боевой скважины ПЯВ «Кристалл». Условные обозначения: 1 — объёмная активность трития в ручье, вытекающем из-под насыпи (саркофага); 2 — объёмная активность трития в остальных водных пробах площадки ПЯВ «Кристалл»; 3 — региональный фоновый уровень активности трития в речной воде [Государственный доклад..., 2015, 2021]. Прерывистая линия — предполагаемая динамика снижения активности трития

Как видим, в промежуток с 2002 по 2008 гг. в вытекающем из-под насыпи ручье наблюдалось резкое — на порядок — снижение активности трития, а с 2008 г. по настоящее время идет ее плавное снижение (рис. 3.19). Активность трития в поверхностных стоках по мере удаления от насыпи снижается: в 40–50 м ниже по склону в небольшом водоёме, куда впадает ручей, активность трития составляет 5,0–8,8 Бк/дм³, а ещё дальше в 170–180 м — в ручье Улахан-Бысыттаха она не больше 6,9 Бк/дм³. В реке Далдын, куда впадает Улахан-Бысыттаха (участок 3 на рис. 3.16, а), в разные годы были установлены активности трития от 5,6 до 7 Бк/дм³. Активность трития в ручье Улахан-Бысыттаха, реке Далдын в 2–4 раза превышает региональный фоновый уровень — 2,18 Бк/дм³ [Государственный доклад..., 2015]. Данный факт свидетельствует о влиянии объекта ПЯВ «Кристалл» на поверхностные воды района, который требует дальнейшего изучения.

Как уже было отмечено, ПЯВ «Кристалл» был произведён на глубине 98 м в многолетнемерзлых породах. Вследствие взрыва большой объём пород был поколот и раздроблен, сформирована ослабленная флюидопроницаемая зона вокруг боевой скважины радиусом до 200 м. В результате зондирований методом переходных процессов под центральной зоной взрыва была выявлена локальная геоэлектрическая аномалия сверхнизких электросопротивлений (рис. 3.20) [Геоэкологическая модель..., 2012]. Геоэлектрическая аномалия указывает, по-видимому, на формирование локальной гидрогеологической аномалии, то есть на подъём напорных подземных рассолов из нижезалегающего водоносного горизонта. Возникшая взаимосвязь между водоносным горизонтом и центральной зоной взрыва могла способствовать переносу трития из ЦЗВ с подземными рассолами по геологической среде.

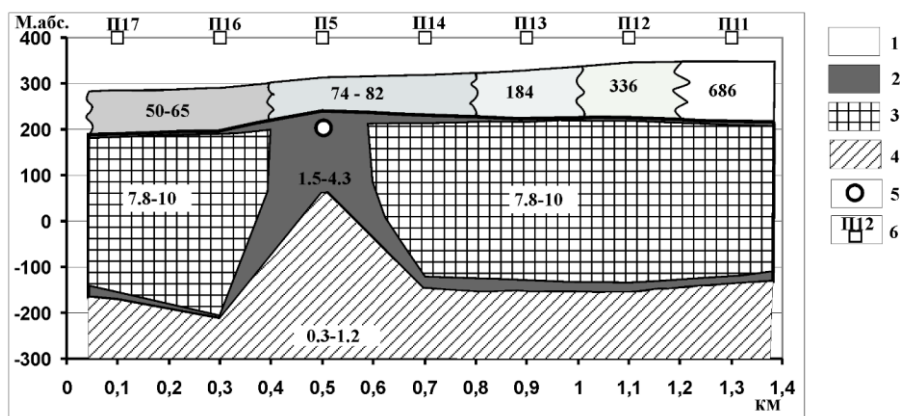


Рис. 3.20. Геоэлектрическая модель недр у объекта ПЯВ «Кристалл» по данным зондирования методом ЗМПП по субширотному профилю [Геоэкологическая модель..., 2012]. Условные обозначения: 1 — верхний слой из частей от светлосерого до белого — многолетнемерзлые породы с указанными удельными электрическими сопротивлениями от 50 до 686 Ом·м; 2 — слой С-1 наверху и слой С-2 внизу с высокой электрической проводимостью и их слияние у полости взрыва; 3 — слой морозных пород П; 4 — нижнее высокопроводящее основание С-3; 5 — полость взрыва; 6 — пикет ЗМПП и его номер

Известно, что на карьере кимберлитовой трубки «Удачная», расположенной в 4 км к юго-западу от объекта «Кристалл» (рис. 3.16), в 1983 г. при достижении глубины 100 м (190–220 абс. м) началась разгрузка верхнекембрийских подземных рассолов [Голубов и др., 2004]. По мере дальнейшего углубления карьера поступление рассолов началось уже из более водообильного среднекембрийского водоносного горизонта. С каждым годом объёмы рассолов, поступающих в карьер, увеличивались (рис. 3.21). Карьер, а позднее и рудник постоянно осушались специально разработанной системой дренажа, при этом вокруг карьера и рудника сформировалась глубокая депрессионная воронка, в которую устремились подземные рассолы из прилегающей территории. При годовых объёмах примерно в 1 млн м³ подземных рассолов, стекающих в горные отработки, общий объём рассолов, поступивших в горные отработки за период с 1983 по 2018 гг. отработки кимберлитовой трубки «Удачная», оценивается не менее, чем в 26,5 млн м³.

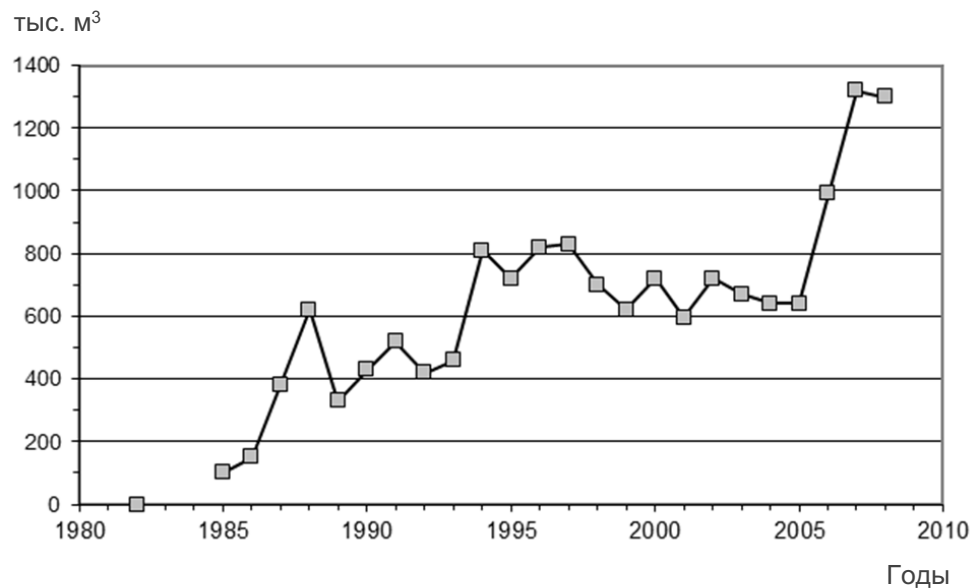


Рис. 3.21. Годовой объём подземных рассолов, поступивших в карьер кимберлитовой трубки «Удачная» в период с 1985 по 2008 гг. [Алексеев, 2009]

Формирование локальной гидрогеологической аномалии под центральной зоной взрыва и предположительное установление ее взаимосвязи с нижезалегающим водоносным горизонтом, согласно результатам зондирования методом переходных процессов, вкупе с формированием после 1983 г. глубокой депрессионной воронки вокруг карьера и рудника кимберлитовой трубки «Удачная» из-за постоянного осушения горных выработок, по-нашему мнению, могло способствовать движению трития и других техногенных радионуклидов из ЦЗВ ПЯВ «Кристалл» в сторону карьера и рудника с подземными рассолами.

Между тем в 2002 г. двумя независимыми лабораториями в подземных рассолах, отобранных в карьере, был обнаружен тритий с активностью от 23,8 до 61 Бк/дм³ [Голубов и др., 2004, Мониторинг аварийных..., 2004]. В 2002 г. подземные рассолы отбирались со стены карьера в диапазоне глубин от 310 до 490 м — до самого дна карьера. Нами в 2008 г. в подземных рассолах, отобранных на дне карьера — на глубине 585 м (–265 абс. м), определена активность трития в 146 Бк/дм³, а в руднике на глубине 930 м (–600 абс. м) — 117 Бк/дм³ (рис. 3.22). В последующие годы в подземных рассолах, отобранных там же, наблюдалось снижение активности трития: в 2018 г. максимальная активность в рассолах составила всего 13,4 Бк/дм³, что в 10 раз меньше, чем в 2008 г. В подземных рассолах кембрийского возраста (возрастом не менее 480 млн лет) в условиях перекрытия сверху толщей многолетнемерзлых пород и затруднённого водообмена тритий не может присутствовать в силу несравнимо короткого периода полураспада (12,3 года). По нашему мнению, источником трития в подземных рассолах карьера и рудника, по-видимому, является объект ПЯВ «Кристалл», но пути переноса трития в геологической среде района могут быть более сложными, чем представляется. Поскольку нами тритий обнаружен в рассолах рудника на глубине до 930 м от поверхности земли, то, вероятно, в пределах горных выработок происходит смешение подземных рассолов разных

водоносных горизонтов. Кроме того, в горных выработках при добыче применяют технологические воды поверхностного происхождения, также сюда могут поступить поверхностные пресные стоки и атмосферные осадки. И во всех этих видах вод также может содержаться тритий. Для выяснения подземного пути дальнего переноса трития необходимо изучение его содержания в подземных рассолах, отобранных из гидрогеологических скважин.

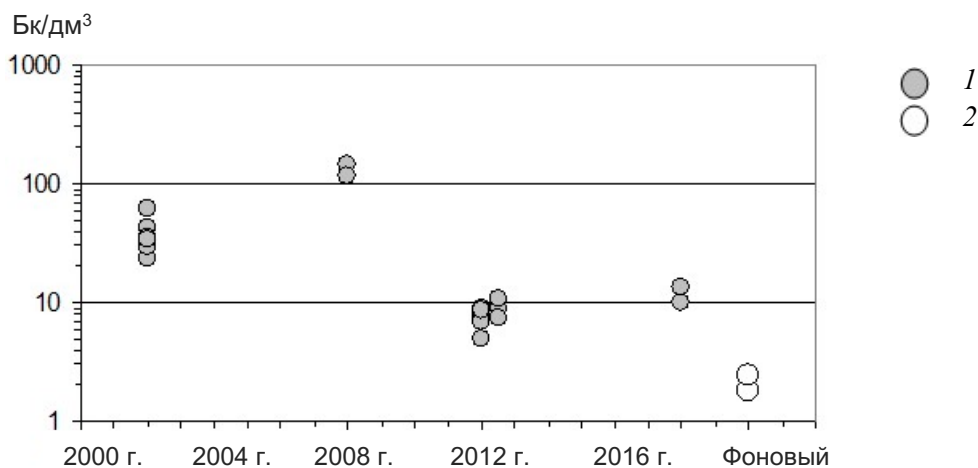


Рис. 3.22. Объёмная активность трития в подземных рассолах, поступающих в карьер и рудник кимберлитовой трубки «Удачная»: 1 — объёмная активность трития в подземных рассолах; 2 — региональный фоновый уровень активности трития в речной воде. Данные об активности трития в подземных рассолах в 2002 г. [Голубов и др., 2004], региональный фоновый уровень в поверхностных водах [Государственный доклад..., 2015, 2021]

Итак, в настоящее время в поверхностных водах и подземных рассолах района объекта ПЯВ «Кристалл» наблюдается снижение активности трития: в поверхностных водах с приблизительно 221 Бк/дм³ в 2002 г. до 5,0–8,8 Бк/дм³ в 2018 г., в подземных рассолах с приблизительно 146 до 5,0–13,4 Бк/дм³. Активность трития в водотоках района при этом превышает региональный фоновый уровень в 2–4 раза. Необходимо отметить, что все измеренные показатели активности трития в поверхностной воде и подземных рассолах района объекта «Кристалл» за годы наблюдений были значительно ниже уровня вмешательства для питьевой воды, равного 7600 Бк/кг, и не представляют опасности для населения и работников горнодобывающих компаний.

2.4. Тритий в районе подземного ядерного взрыва «Кратон-3»

Краткая характеристика объекта ПЯВ «Кратон-3». ПЯВ «Кратон-3» мощностью 22 кт ТЭ был произведён для сейсмозондирования 28 августа 1978 г. на правом берегу реки Марха, в 38 км к востоку от пос. Айхал (Западная Якутия), на глубине 577 м, в глинистых известняках и мергелях среднекембрийского возраста (см. рис. 3.15, 3.16). Нарушения в технологии забивки боевой скважины привели к аварийному выбросу через устье скважины около 2 % общей активности, появившейся при взрыве. Радиоактивное газово-пылевое облако

двигалось по ветру на северо-восток, и его основная активность выпала в первых 3–4 км, приводя к гибели прилегающего массива северной тайги. Погибший лес, названный «мёртвым», представляет собой до сих пор сухой лиственницы Гмелина (*Larix Gmelinii*), со слабой порослью низкорослых кустарников, почти повсеместно развит мохово-лишайниковый покров (род *Cladina*, род *Dicranum*, *Hylocomium* и др.) (рис. 3.23). На основе дешифрирования космоснимка Landcat и применения ГИС-технологий рассчитана площадь погибшего леса — 1,6 млн м² с протяжённостью до 3,6 км.



Рис. 3.23. Вид на погибший лес к северо-востоку от устья боевой скважины ПЯВ «Кратон-3» в сентябре 2015 г. (фото Артамоновой С. Ю.). На берегу — насыпь над эпицентром взрыва, на переднем плане — русло реки Марха

В 1981 г. были проведены дезактивационные работы: в 10–15 м к западу от устья боевой скважины был сооружён котлован объёмом около 4000 м³, в котором захоронили загрязнённое буровое оборудование, технику и верхний слой почв с рабочей площадкой. В 2006 г. над озером, появившимся над устьем боевой скважины и могильником, была сформирована насыпь из аллювия местного ручья мощностью примерно 1,5 м и площадью 0,731 га (рис. 3.24, 3.25).

До 1990 гг. секретный объект «Кратон-3» оставался без наблюдений, хотя в 1984 г. был случай «открытия» якутскими геологами участка тайги с радиоцезиевой аномалией непонятного происхождения (дальнейшего исследования по этому факту не было). С 1993 г. на объекте ПЯВ «Кратон-3» были начаты радиоэкологические исследования [Геденов и др., 1993, Бурцев, Колодезникова, 1997]. В 2002 г. Министерством охраны природы Республики Саха (Якутия) (отв. исп. В. К. Ковалев) в пределах «мёртвого леса» проведена детальная пешеходная радиометрическая и γ -спектрометрическая съёмка. Следом

были начаты работы по изучению распространения ^{90}Sr , ^{60}Co , ^{241}Am и изотопов ^{238}Pu , $^{239,240}\text{Pu}$ и их распределения в компонентах экосистем [Геденов и др., 2004; Radiostrontium..., 2007; Radioecological studies..., 2009].



Рис. 3.24. Радиометрические измерения на насыпи объекта ПЯВ «Кратон-3» в сентябре 2015 г. (фото Артамоновой С. Ю.)

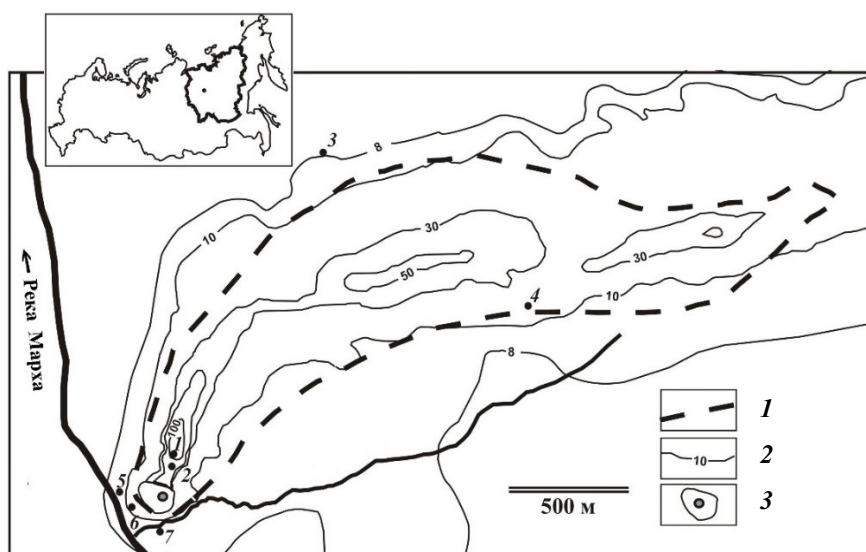


Рис. 3.25. Схема радиоактивного следа на объекте ПЯВ «Кратон-3»:
 1 — граница «мёртвого леса» по результатам дешифровки космоснимка Landsat;
 2 — изолинии МЭД γ -излучения, мкР/ч (по Ковалеву В. К.) [Геоэкологическая модель..., 2012]; 3 — устье боевой скважины на насыпи. В верхней части приведена схема расположения объекта МПЯВ «Кратон-3» на территории России

Активность в пределах «мёртвого леса» проявлена неравномерно: по распределению мощности экспозиционной дозы γ -излучения выделены три пятна, названные ближним, средним и дальним следами (см. рис. 3.25). По результатам наших измерений, в 2008 г. МЭД в ближнем следе составляли от 30 до 130 мкР/ч, в среднем — от 30 до 70 мкР/ч, в дальнем — от 30 до 55 мкР/ч. Наиболее сильно загрязнён ближний след, по мере удаления от скважины МЭД постепенно снижаются.

В древесине мёртвых деревьев в 2002 г. всего содержалось, Бк/кг: ^{90}Sr — до 6, ^{137}Cs — 10–14, $^{239,240}\text{Pu}$ — 0,041–0,064 [Геденов и др., 2004]. В опавшей коре мёртвых деревьев ^{90}Sr больше на три порядка и достигает 200–490 Бк/кг, ^{137}Cs и $^{239,240}\text{Pu}$ — в среднем больше в 10 раз: 120–140 и 0,6–5,0 Бк/кг соответственно [Геденов и др., 2004]. После опадения загрязнённой коры основными депонентами радионуклидов в районе объекта ПЯВ «Кратон-3» являются лесная подстилка и верхняя часть гумусового горизонта почв [Radiostrontium..., 2007; Radioecological studies..., 2009].

В районе, сложенном ордовикскими и кембрийскими карбонатными породами, развиты маломощные мерзлотные дерново-карбонатные почвы [Чевычелов и др., 2006]. Мощность лесной подстилки ограничивается 2–3 см, гумусового горизонта — всего от 1 до 6 см. Поле МЭД формируется в основном за счёт содержания в них радиоцезия: коэффициент корреляции между МЭД и содержанием радиоцезия составил 0,87 при выборке 129 параллельных γ -спектро- и радиометрических измерений. В почвах и мохово-лишайниковом покрове общая активность ^{90}Sr преобладает над активностью ^{137}Cs — почти в 2 раза, над активностью $^{239,240}\text{Pu}$ — примерно на 2 порядка. Активность ^{238}Pu составляет примерно 5–6 % от активности $^{239,240}\text{Pu}$.

Проведенная радиометрическая съемка позволила определить, что на ненарушенных природных ландшафтах естественная МЭД составляет 5–6 мкР/ч, что вполне ожидаемо для подстилающих пород района — нижнеордовикских и кембрийских известняков и доломитов. Значения МЭД в 8–12 мкР/ч по внешнему краю «мёртвого леса» являются не вариацией естественного поля γ -излучения, а краевыми зонами радиоактивного загрязнения: во мхах ^{90}Sr — до $123,5 \pm 11,5$ Бк/кг, ^{137}Cs — 250 ± 18 Бк/кг; в лесной подстилке ^{90}Sr — до $98 \pm 4,9$ Бк/кг, ^{137}Cs — $56,2 \pm 18$ Бк/кг, $^{239,240}\text{Pu}$ — 5,1–0,4 Бк/кг. Кроме этого, МЭД в 8–12 мкР/ч на небольших участках живого леса к югу от «мёртвого» являются локальными пятнами радиоактивного загрязнения, сформированными порывами ветра и занесением вещества из основного радиоактивного облака, двигавшегося на восток.

Все эти годы под действием экзо- и биогенных процессов происходило перераспределение активности, снос и переотложение радионуклидов, как в пределах «мёртвого леса», так и в сопряжённые ландшафты, на фоне снижения общего уровня активности за счёт естественного распада.

В 2008 г. в 145 м к северу от устья боевой скважины в небольшом замкнутом понижении на пологом склоне, у опушки «мёртвого леса» оконтурена локальная аномалия МЭД 400–420 мкР/ч, размер которой составляет примерно 3×3 м. Здесь в 2001 г. В. П. Рамзаевым в лесной подстилке и первых верхних сантиметрах гумусового горизонта установлены очень высокие активности, кБк/кг: ^{90}Sr — 188, ^{137}Cs — 86,7 [Radiostrontium..., 2007; Radioecological studies..., 2009], а в 2003 г.

П. И. Собакиным [Чевычелов и др., 2006] измерены большие содержания ^{90}Sr — на 37 %, ^{137}Cs — на 9 % по сравнению с двумя годами ранее. Этот факт указывает на продолжающееся накопление радионуклидов, сносимых поверхностными стоками с «мёртвого леса». Кроме радиоцезия и радиостронция, в почвах этой аномалии были выявлены и изотопы Рu: в 2002 г. А. Д. Геденовым [Геденов и др., 2004] определены активности $^{239,240}\text{Pu}$ — 5,9 кБк/кг, ^{238}Pu — 0,29 кБк/кг. Несомненно, аномальный участок у опушки «мёртвого леса» можно рассматривать только лишь как промежуточный этап на пути дальнейшей миграции радионуклидов. «Мёртвый лес» находится в бассейне водосбора реки Марха и ручья Безымянный (рис. 3.26).

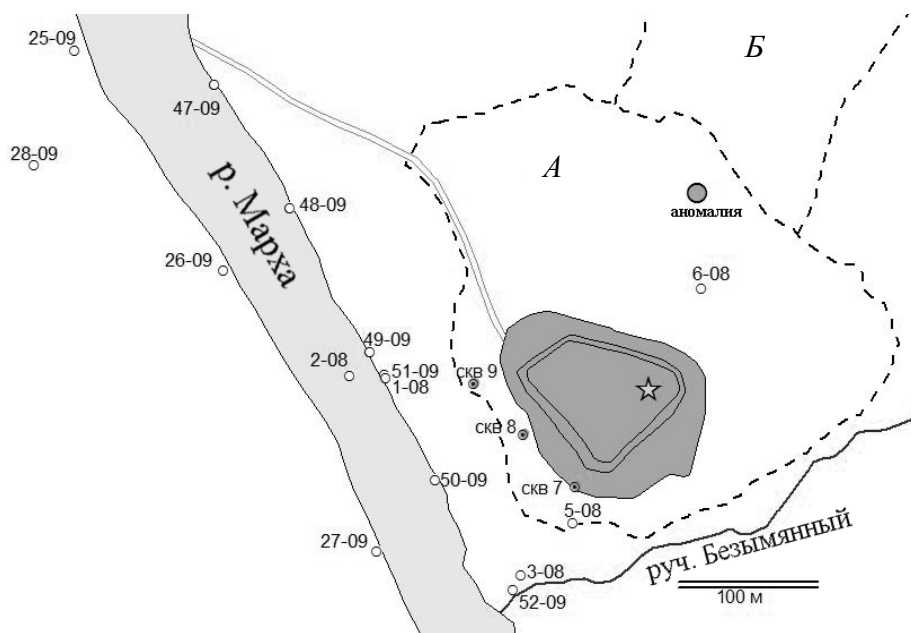


Рис. 3.26. Схема отбора проб природных вод рядом с объектом ПЯВ «Кратон-3». Штриховой линией показаны границы: А — рабочей площадки; Б — «мёртвого леса»; две параллельные тонкие линии — дорога; серая площадка со звездой — насыпь и устье боевой скважины

Детерминируемые местным рельефом поверхностные стоки со среднего и дальнего следов стекаются в ручей Безымянный, стоки с наиболее загрязнённого ближнего следа впадают частью в реки Марху напрямую, частью — в тот же ручей Безымянный. В 2009 г. во временном ручейке, вытекающем со стороны опушки леса, в 68 м южнее аномальной зоны (рис. 3.26, т. 6-08), определено высокое содержание трития — 68 ± 8 Бк/л, что превышает примерно в 13 раз местный фоновый уровень, определённый нами в диапазоне от 5 ± 2 до 6 ± 2 Бк/дм³. Местная фоновая точка выбрана в реке Марха выше по течению и в мелких ручьях. Местный фоновый уровень трития в 2009 г. примерно в 2 раза превышал региональный, равный 2,8 Бк/дм³, но был сравним с фоновой активностью трития в реке Енисей, которая, по данным Л. Г. Бондаревой, в начале 2000-х гг. составляла 5 Бк/дм³ [Bolsunovsky, Bondareva, 2003].

В воде этого временного ручейка (рис. 3.26, т. 6-08) β -активность, связанная со ^{90}Sr , составляет $2,11 \pm 0,08$ Бк/л, что превышает уровень вмешательства (УВ) для питьевой воды более чем в 2 раза, α -активность, связанная в основном с изотопами Pu, равна $0,54 \pm 0,06$ Бк/л, что превышает УВ примерно в 2,5 раза.

В мае 2002 г. Минэкологии Республики Саха (Якутия) была отобрана проба паводковых вод ручья Безымянный, в котором установлены валовые содержания основных радионуклидов (вместе со взвесью), Бк/л: ^{90}Sr — $40,2 \pm 12,9$, ^{137}Cs — $6,2 \pm 0,6$ и $5,6 \pm 0,6$, $^{239,240}\text{Pu}$ — $0,14 \pm 0,01$, ^{238}Pu — $0,007 \pm 0,001$. В августе 2009 г. в этом ручье (в фильтрате) обнаружены, Бк/л: ^{90}Sr — $0,12 \pm 0,004$, $^{239,240}\text{Pu}$ — $(4 \pm 0,16) \cdot 10^{-4}$, ^{238}Pu — $(3,9 \pm 0,15) \cdot 10^{-3}$.

В паводковой воде ручья Безымянный 2002 г., как и августовской воде 2009 г., отобранной нами, было повышено отношение радионуклидов: $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ — до 6,5, $^{90}\text{Sr}/^{239,240}\text{Pu}$ приблизительно до 300, по сравнению с отношением радионуклидов в их основных источниках — почвах и мохово-лишайниковом покрове «мёртвого леса», равных примерно 2 и 100 соответственно. Это указывает на высокую водную подвижность радиостронция и его массоперенос с водными потоками преимущественно в растворе, в том числе и в паводок.

Отношение $^{137}\text{Cs}/^{239,240}\text{Pu}$ в паводковой воде 2002 г. примерно 40–44, а содержание ^{238}Pu составляло около 5 % от содержания $^{239,240}\text{Pu}$, что сравнимо с их отношением в компонентах «мёртвого леса», где среднее $^{137}\text{Cs}/^{239,240}\text{Pu}$ составляло примерно 32–39, а содержание ^{238}Pu — примерно 5–6 % от содержания $^{239,240}\text{Pu}$. По-видимому, весной при таянии снега и паводков (району характерна стремительная короткая весна) в массопереносе ^{137}Cs и изотопов $^{239,240}\text{Pu}$ с «мёртвого леса» преобладает механический снос. В остальное время массоперенос радионуклидов преимущественно идёт в жидкой фазе вследствие небольших скоростей водотоков в условиях равнинно-холмистого рельефа.

Летом, в беспаводковое время, по данным 2009 г., в условиях равнинно-холмистого рельефа и невысоких скоростей водотоков изотопы Pu преимущественно мигрируют в растворе — в жидкой фазе. При этом содержание ^{238}Pu в ручье Безымянный сравнимо с его содержанием в весенней пробе 2002 г.: $(3,9 \pm 0,15) \cdot 10^{-3}$ против $(7 \pm 1) \cdot 10^{-3}$ и приблизительно в 10 раз больше содержаний $^{239,240}\text{Pu}$, которых всего $(4 \pm 0,16) \cdot 10^{-4}$ Бк/л против $0,14 \pm 0,02$ Бк/л в паводковой воде 2002 г.

В 2008 г. в ручье Безымянный зафиксирована активность ^3H — 30 ± 5 Бк/л, что в 2 раза меньше, чем в ручейке (т. 6-08) у опушки «мёртвого леса». Это вполне логично по причине большей водности ручья Безымянный и эффекта разбавления. В засушливом 2009 г. ручеек у опушки «мёртвого леса» отсутствовал, а в сильно обмельчавшем (по сравнению с 2008 г.) ручье Безымянный содержание ^3H было повышено почти в 2 раза — до $57 \pm 2,8$ Бк/л.

Итак, на основе вышеприведённых данных становится несомненным факт постоянного водного смыва радионуклидов с «мёртвого леса», механический снос для изотопов Pu и ^{137}Cs при этом становится значимым только в паводки.

В реке Марха рядом с объектом ПЯВ «Кратон-3» в 2009 г. установлены следующие содержания радионуклидов: ^{90}Sr — $0,078 \pm 0,003$ Бк/л, $^{239,240}\text{Pu}$ — $(6 \pm 0,24) \cdot 10^{-4}$ и ^{238}Pu — $(18,6 \pm 0,7) \cdot 10^{-3}$, ^3H — от $13 \pm 2,0$ до $52,1 \pm 2,6$ Бк/л (рис. 3.26, точки 48-09–50-09). Отношение $^{90}\text{Sr}/^{239,240}\text{Pu}$ в реке Марха равно 130, содержание ^{238}Pu в 31 раз больше содержания $^{239,240}\text{Pu}$. Удивительно, но активности ^{238}Pu в 10–30 раз выше активности $^{239,240}\text{Pu}$, что указывает на большую водную подвижность

изотопа ^{238}Pu и в корне отличается от отношения этих изотопов Pu в лишайниках, почвах «мёртвого леса» и в пробе паводковой воды ручья Безымянный 2002 г. По нашим оценкам, расход реки Марха превосходит расход ручья Безымянный примерно в 10–20 раз (с учётом измеренных нами скоростей течения, глубин, ширины водотоков с примерным расчётом их площади) и потому после смешения с водами ручья Безымянный — основным поставщиком радионуклидов — содержание трития должна бы составить всего 8,4–8,8 Бк/л. Однако в реке Мархе, вопреки ожиданиям, установлены высокие содержания трития — до 52 Бк/л, сравнимые с показателем в стоках с ближнего следа «мёртвого леса» и в ручье Безымянный. Отсутствие эффекта разбавления в содержаниях ^3H в полноводной реке Марха заставило нас задуматься.

В реку Марха стекают не только стоки с загрязнённого «мёртвого леса», но и стоки из могильника загрязнённой техники у устья боевой скважины. В 2008 г. на поверхности ручейка, вытекающего из-под насыпи, нами установлены разноцветные пятна горюче-смазочных материалов, что, вероятнее всего, обусловлено вымыванием из могильника захороненной техники (рис. 3.27).



Рис. 3.27. Стоки с радужной технической плёнкой под насыпью ПЯВ «Кратон-3» в 2008 г. (фото Артамоновой С. Ю.)

В этом же ручейке (см. рис. 3.26, т. 5-08, и табл. 3.14) установлены: содержание трития — 18 Бк/л; общая β -активность, связанная со ^{90}Sr , — $0,398 \pm 0,028$ Бк/л, что меньше уровня вмешательства [Нормы радиационной..., 2009] примерно в 2 раза; α -активность, связанная в основном с изотопами Pu , — $0,29 \pm 0,01$ Бк/л, что превышает УВ.

В водоёме (скорее термокарстовом), сформировавшемся после взрыва у устья боевой скважины и существовавшем вплоть до строительства насыпи

в 2006 г., Ю. В. Дубасовым в 1996 г. была установлена активность трития — 700 ± 250 Бк/л, а в 2001 г. — уже 320 ± 32 Бк/л [Radioecological studies..., 2009]. В 2001 и 2003 гг. в водоёме зафиксированы содержания ^{90}Sr — 38 ± 6 и 49 ± 18 Бк/л соответственно [Radioecological studies..., 2009], что превышали приблизительно в 7,5–10 раз уровень вмешательства по радиостронцию.

Ниже, по склону в грунтовых водах в 2007 г. установлены содержания растворённого ^{90}Sr — $8,75 \pm 1,63$ Бк/л, что превышало примерно в 1,5 раза УВ. В 2008–2009 гг. в грунтовых водах (рис. 3.26, точки 1-08 и 51-09) нами установлены содержания: ^{90}Sr — всего $1,99 \pm 0,07$ Бк/л, трития — от 19 ± 6 до $67,2 \pm 1,9$ Бк/л, $^{239,240}\text{Pu}$ — $(4 \pm 0,16) \cdot 10^{-4}$ и ^{238}Pu — $(7,8 \pm 0,3) \cdot 10^{-3}$ Бк/л; их содержания меньше УВ. Источников радионуклидов, выявленных в грунтовых водах склона реки Марха, могло быть несколько: кроме стоков «мёртвого леса» и могильника, ещё может быть третий. Вспомним, что аварийный объект ПЯВ «Кратон-3» — это не только «мёртвый лес» — поверхностный источник активности, это не только могильник загрязнённой техники и почв, но это также сложный радиогеоэкологический объект. По сути, полость взрыва представляет собой неконтролируемое подземное захоронение радиоактивных отходов, откуда на поверхность могут просачиваться радионуклиды. Для выяснения факта просачивания подземной активности по стволовой зоне боевой скважины рассмотрим ионный состав грунтовых вод.

Местные поверхностные воды — слабощелочные гидрокарбонатные магниевые-кальциевые, предопределённые составом подстилающих пород района (известняками и доломитами). При одинаковом ионном составе наблюдается последовательное снижение минерализации от малого водотока к большему: в стоках «мертвого леса» — 430 мг/л, в ручье Безымянный — 330–390 мг/л, в реке Марха — 290–170 мг/л, что можно объяснить эффектом разбавления по мере увеличения водности водотоков в этой цепи.

Три наблюдательные скважины у насыпи объекта ПЯВ «Кратон-3» пробурены всего на глубину до 2,5–3,0 м (см. рис. 3.26), из которых только скважины 7 и 8 захватывают воды сезонно-талого слоя, формируемые в основном поверхностными и метеорными водами, и то преимущественно в годы с превышением среднесезонного уровня осадков (многоводные годы); третья скважина (9) заложена неудачно и сухая. В грунтовых водах двух скважин (см. рис. 3.26) при их минерализации в 515–560 мг/л установлены существенные концентрации хлоридов — до 250–298 мг/л и натрия — до 143–145 мг/л, таким образом, тип вод становится гидрокарбонатно-хлоридным кальциево-натриевым:

Известно, что в регионе развиты напорные солёные подземные водоносные горизонты [Климовский, Готовцев, 1994]. Данные по ионному составу вод из наблюдательных скважин указывают на просачивание этих подземных солёных вод по стволу боевой скважины на поверхность. Другого объяснения появлению хлоридов натрия в грунтовых водах под насыпью объекта ПЯВ «Кратон-3» нет. Наличие в значимых концентрациях Cl^- , Na^+ в ручейке из-под насыпи (рис. 3.26, т. 5-08) и в грунтовых водах из закопуши на подножье склона на берегу реки Марха (рис. 3.26, точки 1-08, 51-09) указывает на следы просочившихся подземных солёных вод после смешения с пресными грунтовыми водами.

Таким образом, при анализе имеющихся данных выявляются новые «границы» объекта ПЯВ «Кратон-3»: картина всё более осложняется. С твёрдостью можем говорить, что активность ручья Безымянного и мелких поверхностных водотоков

у опушки «мёртвого леса» (выше по рельефу от насыпи) формируется вследствие загрязнения из зоны «мёртвого леса» — с очевидного поверхностного источника радиоактивности, который и был предметом изучения ранее проведённых здесь работ. По нашему мнению, в активность поверхностных и грунтовых вод у боевой скважины и ниже по склону могут вносить свой вклад другие источники: как существующий под насыпью радиоактивный могильник, так и подземные солёные воды, просочившиеся по стволу скважины (в том случае, если последние загрязнены от подземного источника — полости взрыва).

В реке Марха, куда стекают эти грунтовые воды со склона, ничуть не меньше радионуклидов, чем в грунтовых склоновых водах, а даже больше: $^{239,240}\text{Pu}$ — $(6,0 \pm 0,24) \cdot 10^{-4}$ и ^{238}Pu — $(18,6 \pm 0,7) \cdot 10^{-3}$, ^3H — $52,1 \pm 2,6$ (точки 48-09, 49-09 на рис. 3.26). Если высокие активности радионуклидов в грунтовых водах склона ожидаемы и логичны, то факт высоких содержаний изотопов плутония и трития в речной воде у места разгрузки грунтовых стоков склона невозможно объяснить только в связи с этими поверхностными склоновыми стоками. Можно предположить, что их источниками под склоном ПЯВ являются не только стоки с «мёртвого леса», не только могильник, не только выходы подземных вод из устья скважины. Есть и иной, четвёртый подземный источник, который вытекает из полости взрыва в недрах и который, возможно, использует ствол боевой скважины на своём пути, но изливается в реку под землёй, тем более что ствол боевой скважины пройден совсем рядом, всего в 160 м от реки Марха. И именно наличие этого постоянного подводного выхода активности под склоном реки, как предполагаем, обуславливает высокие содержания радионуклидов в речной воде и слабый эффект разбавления речной водой.

По мнению К. И. Микуленко, подземный ядерный взрыв «Кратон-3» был произведён в непосредственной близости от тектонического разлома северо-северо-западного простирания (выявленного при дешифрировании аэроснимков), проходящего по руслу реки Марха [Микуленко и др., 2006]. Известно, что при бурении боевой скважины в 1977 г. в интервале 165–186 м глубины был пройден поглощающий промывочную жидкость трещиноватый горизонт, который, по нашему мнению, и являлся зоной разлома, имеющего северо-северо-восточное падение. Заметим, что так и остались неизвестными результаты трёх попыток герметизации этого поглощающего горизонта путём закачки цементного раствора для установки изоляционного моста. Аварийный ПЯВ «Кратон-3» сильно изменил не только поверхностные ландшафты, но и недра: он мог раскрыть тектонический разлом и увеличить трещиноватую приразломную зону. Просачивание на поверхность радионуклидов из полости взрыва по трещиноватой зоне тектонического разлома можно объяснить путём массового отбора природных вод района и определения в них содержания трития или проведением так называемой «тритиевой съёмки».

В 2009 г. проанализировано 59 проб из бочажин и ручейков у подножия бортов реки Марха и речной воды с обоих берегов на протяжении до 3,6 км вниз и до 400 м выше по течению от боевой скважины ПЯВ «Кратон-3». Для рис. 3.28 точка 50-09 (см. рис. 3.26) принята за нулевую отметку оси абсцисс в силу того, что расположена по прямой от устья боевой скважины ПЯВ «Кратон-3» на правом берегу реки, точки выше по течению — с отрицательными значениями расстояния.

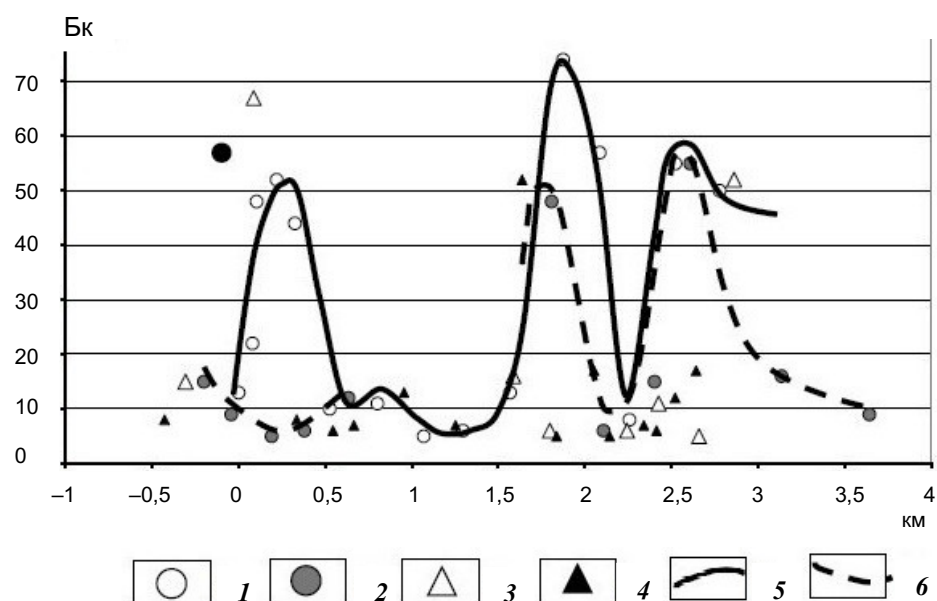


Рис. 3.28. Распределение содержания трития в природных водах в долине реки Марха: 0 км — т. 50-09 под склоном у устья боевой скважины (см. рис. 3.26); по оси абсцисс: справа от 0 км — ниже по течению, слева от 0 км — выше по течению; 1, 2 — речная вода с правого и левого берега соответственно; 3, 4 — воды мелких ручейков и бочажин, стекающих с правого и левого борта реки соответственно; 5, 6 — кривые аномалии (№ 1–3), по данным правого и левого берега соответственно

В речной воде в этой т. 50-09 (рис. 3.28) активность ^3H составляет всего $13 \pm 2,0$ Бк/л. Примерно в 100 м ниже по течению от т. 50-09 начинается первый пик высоких активностей ^3H 44–52 Бк/л, который фиксируется на протяжении еще 225 м ниже. На левом берегу этого участка реки низкие активности ^3H : от 5–15 Бк/л, в среднем — 9,4 Бк/л. Максимальная активность ^3H — 74 Бк/л установлена в речной воде правого берега в 1,9 км ниже по течению от объекта ПЯВ. В речной воде левого берега примерно на том же месте (в 1,8 км ниже по течению) наблюдается также резкий пик активности трития — до 48 Бк/л при фоновом уровне 5–6 Бк/л. Примерно в 150 м выше по течению в маленьком ручье, впадающем в реку с левого берега, зафиксирована активность в 52 Бк/л.

Третий пик активности трития зафиксирован на удалении в 2,5–2,85 км ниже по течению: в речной воде с обоих берегов установлены показатели активности 50–55 Бк/л. Здесь, в бочажине правого берега, также установлена активность в 52 Бк/л. Наличие таких высоких значений активности трития в бочажинах, ручейках и реке на удалении около 3 км от объекта ПЯВ указывает на постоянное местное поступление радионуклидов, но не вследствие стоков с «мёртвого леса» — этого не позволяет местный рельеф. Кроме всего, опробование речной воды реки Чукука — ближайшего левого притока, впадающего в реку Марха в 4 км ниже по течению от объекта ПЯВ, никак не связанной с поверхностным загрязнением при взрыве (ветер дул как раз с юго-запада) в 5,2 км выше ее устья, активность ^3H сейчас превышает фоновый уровень



Рис. 3.29. Содержание трития в воде реки Чукука вверх от устья, расположенного в 4 км севернее от объекта ПЯВ «Кратон-3» и принятого за точку отсчёта расстояния

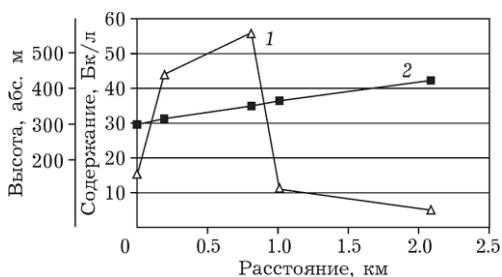


Рис. 3.30. Содержание трития (треугольники) в бочажинах по профилю «водораздел-долина» правого борта реки Марха в 500 м к югу от объекта ПЯВ «Кратон-3». Квадратиками отмечены абсолютные высоты точек проботбора

до 3 раз (до 17 Бк/л). Только на расстоянии в 8,5 км выше устья активность ^3H в реке Чукука снижается до 9 Бк/л (рис. 3.29).

На правом берегу реки Марха, в 500 м к югу от боевой скважины, в пределах ненарушенного живого леса (МЭД 5–6 мкР/ч, местами пятна с 8–9 мкР/ч) нами опробованы воды бочажин по профилю длиной около 2 км. Оказалось, что здесь активность ^3H меняется в весьма широком диапазоне 5–56 Бк/ч (рис. 3.30).

Таким образом, на основе собственных и опубликованных данных показано, что объект ПЯВ «Кратон-3» представляет собой сложный радиогеоэкологический объект, являющийся поверхностным и подземным источником радиоактивности.

1. Мохово-лишайниковый слой, лесная подстилка и первые сантиметры гумусового горизонта почв — основные депоненты поверхностной активности в пределах «мёртвого леса» и большие содержания в них ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239,240}\text{Pu}$,

^{238}Pu на ближнем и среднем следах позволяют отнести их к твёрдым радиоактивным отходам.

2. Выявлен постоянный водный перенос радионуклидов, представленных в основном ^{90}Sr , ^{137}Cs , $^{238,239,240}\text{Pu}$, ^3H , из зоны «мёртвого леса» поверхностными водотоками. В условиях равнинно-холмистого рельефа из-за небольших скоростей водотоков перенос радионуклидов преимущественно идёт в жидкой фазе, за исключением весенних паводков, во время которых механический снос изотопов Pu и ^{137}Cs становится значимым. Содержания ^{90}Sr , изотопов плутония и трития в пробах реки Марха и ручья Безымянного в 2009 г. намного меньше уровней вмешательства, принятых для питьевой воды, однако на 1–3 порядка превышают их соответствующие фоновые уровни в сибирских реках, которые были оценены Ф. В. Сухоруковым с соавторами [Закономерности распределения..., 2004].

3. Смещение отношений активностей радионуклидов позволило выявить, что для ^{137}Cs , ^{238}Pu характерна высокая водная подвижность.

4. Пространственное распределение содержаний трития и других радионуклидов в природных водах района указывает на то, что смыв радионуклидов идёт из подземного могильника, расположенного у устья боевой

скважины, а также постоянно вместе с напорными солеными подземными водами из недр (из полости взрыва) на поверхность выходят радионуклиды. При этом просачивание активности из недр идёт: 1) по ослабленной зоне ствола боевой скважины объекта ПЯВ «Кратон-3» с выходом на поверхность у устья скважины; 2) по трещиноватой зоне тектонического разлома, протяжённого вдоль русла реки Марха, с выходом на поверхность вдоль русла реки и рядом с объектом ПЯВ «Кратон-3», а также на удалении до 3 км от него. Просачивание активности из недр, возможно, идёт и долине реки Чукука — левого притока реки Марха, в 4 км ниже по течению от объекта ПЯВ «Кратон-3», поскольку в ней повышено содержание трития в 3,5 раза по сравнению с местным фоновым уровнем.

2.5. Тритий в поверхностных водах Среднеботуобинского нефтегазоконденсатного месторождения (район семи ПЯВ)

На Среднеботуобинском нефтегазоконденсатном месторождении (СБНГКМ), где в наши дни увеличивающимися темпами идёт добыча нефти, в период с 1976 по 1987 гг. было проведено шесть подземных ядерных взрывов для усиления нефтеотдачи и притоков газа, один взрыв в соленосном пласте — для создания подземной ёмкости для хранения углеводородов.

Целью исследования в 2010 г. была оценка современного состояния геотехногенных систем «полость взрыва ПЯВ — геологическая среда» в пределах СБНГКМ на основе полученных радиоэкогеохимических данных.

Эти взрывы специфические, связанные с пластовыми флюидами в условиях многолетней мерзлоты, кроме того, решалась задача создания ёмкости в соленосных породах. Представление о том, что ПЯВ, произведённый в штатном режиме «при правильно составленных проектах и качественном их выполнении... представляет не большую потенциальную опасность, чем использование в народном хозяйстве изотопных проборов и деятельность атомных объектов — АЭС и заводов по регенерации топлива АЭС» [Кривоухатский, 1982], считается неоправданно оптимистичным и нуждается в дальнейшей верификации.

Краткая характеристика геологической среды СБНГКМ. Месторождение в геоморфологическом отношении расположено в пределах Лено-Вилнойской равнины Средне-Сибирского плоскогорья, в междуречье рек Лены и Вилюя (рис. 3.31, А).

В районе развиты ландшафты средней тайги, преимущественно заболоченные, лиственница Каяндера — доминирующая древесная растительность в условиях распространения сплошной многолетней мерзлоты. Рельеф представляет собой всхолмленную равнину высотой 340–370 абс. м, речной врез составляет 40–70 м. Долины рек — широкие с пологими склонами и с обширными заболоченными поймами, в пределах которых развита сеть стариц и небольших озёр. Основным водотоком района СБНГКМ является река Улахан-Ботуобуйа и её правые притоки: реки Тэлгэспит, Кудулах и Тас-Юрях (рис. 3.31, Б).

В геологическом отношении СБНГКМ располагается в пределах Непско-Ботуобинской антеклизы на юге Сибирской платформы на участке площадью примерно 20×100 км, вытянутом в субмеридиональном направлении (рис. 3.31, Б). В районе развиты дизъюнктивные нарушения сбросово-взбросового типа с амплитудами перемещений до 40 м и более, в основном северо-восточного

простирается, и потому СБНГКМ представляет собой кулисообразную горст-антиклиналь платформенного типа. Отложения венда перекрывают кристаллический фундамент, которые у подошвы представлены терригенными гравелитами, песчаниками курсовской свиты мощностью до 150 м, переходящими выше по разрезу в более мелкообломочные разности, затем в обычные мелководные морские отложения — доломиты, доломит-ангидриты (рис. 3.32).

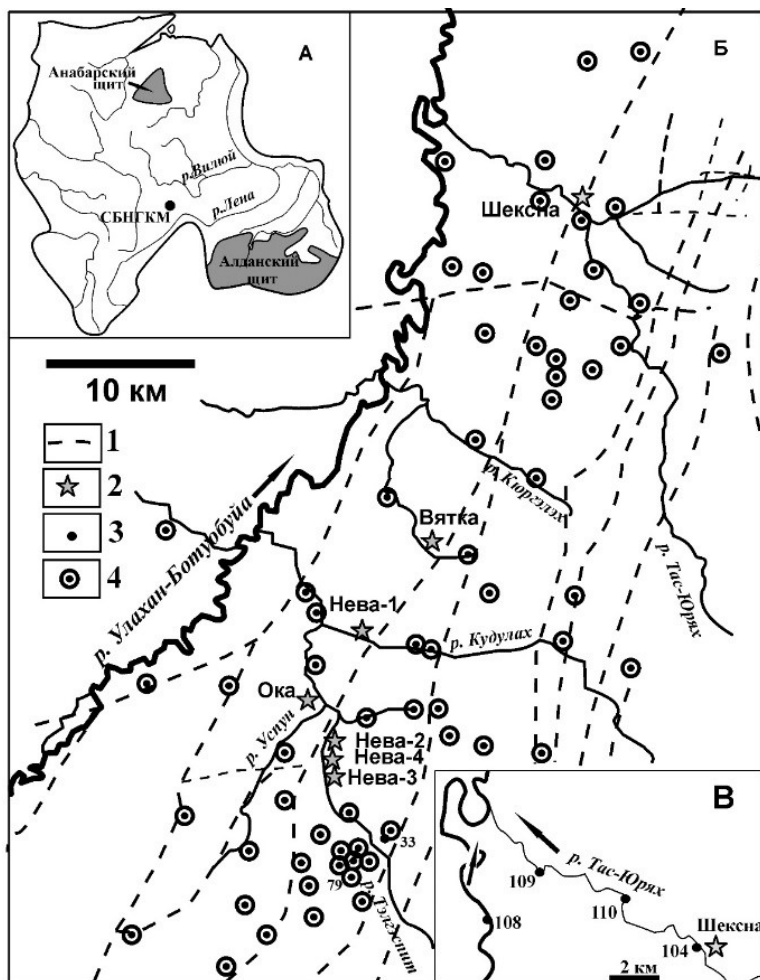
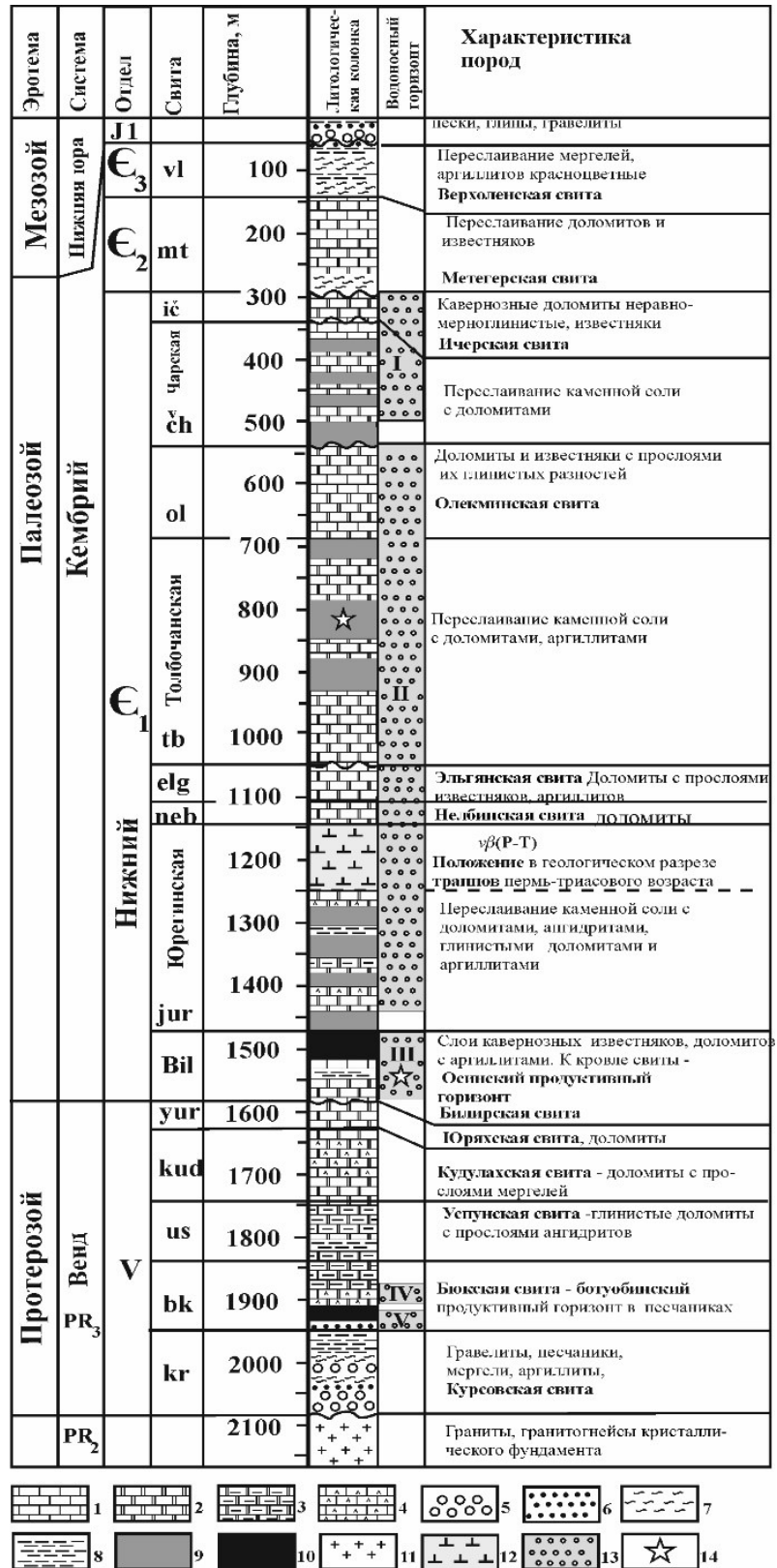


Рис. 3.31. Карта-схема района исследования: 1 — разломы; 2 — объекты ПЯВ; 3 — точка отбора проб поверхностных вод (и его номер); 4 — буровые скважины

Геологическая среда района в основном представлена вендскими и нижнекембрийскими отложениями мелководного моря общей мощностью примерно 2000 м: доломиты и их глинистые и ангидритизированные разности, преобладающие в разрезе, перемежаются пластами каменных солей. У поверхности земли кембрийские отложения перекрывает прерывистый слой юрских терригенных отложений мощностью от 0 до 40 м и четвертичные отложения, имеющие ограниченное распространение и в основном приуроченные к пониженным участкам рельефа — долинам водотоков, их мощность максимально достигает 14 м.



В пермь-триасовое время было одноактное внедрение трапповой интрузии, которое сформировало в кембрийских породах пластовое тело толщиной от 42 до 177 м, ступенчато поднимающееся с запада на восток по разрезу: с глубины примерно 1200 м в западной части до 550 м глубины в восточной части месторождения. По интенсивному поглощению бурового раствора выявлено, что контактные зоны траппов имеют высокую трещиноватость. В геологическом разрезе у объектов ПЯВ траппы располагаются в кровле юрегинских карбонатов нижнего кембрия на глубине 1100–1200 м (рис. 3.32).

В геологической среде выделено пять водоносных комплексов (рис. 3.32) [Нефтегазовая гидрология..., 1984, Вожов, 1987, Анциферов, 1989]:

I — вендский терригенный на глубине 1850–1930 м с пластовым давлением 14 МПа, что на 4–5 МПа ниже нормального гидростатического (всего 209 замеров);

II — вендский карбонатный на глубине 1830–1890 м с пластовым давлением 14–16 МПа, что до 2,5 МПа ниже нормального гидростатического;

III — нижнекембрийский подсолевой карбонатный на глубине 1420–1530 м с высоким пластовым давлением, превышающим нормальное гидростатическое на 1–1,5 МПа, максимально до 32 МПа (55 замеров);

IV — нижнекембрийский межсолевой на глубине с 500 до 1400 м, с близким к нормальному гидростатическому или повышенным пластовым давлением (7 замеров);

V — нижнекембрийский надсолевой безнапорный на глубине от 100 до 400 м инфильтрационного типа (13 замеров).

Для I, II и III водоносных комплексов характерны метаморфизованные хлоридные натрий-кальциевые рассолы с минерализацией 350–450 г/л. Дебит скважин из I и II водоносных комплексов изменялся от 5–10 до 50–80 м³/сут при динамическом уровне 1200–1500 м, для III — 1–2 м³/сут при динамическом уровне 1000–1200 м. Если подсолевые водоносные комплексы (I–III) изучены достаточно подробно в связи с приуроченностью к ним продуктивных пластов месторождения, то IV и V водоносные комплексы изучены очень слабо.

Единичные данные указывают на блоковое распространение IV межсолевого водоносного комплекса с большим диапазоном изменения пластовых давлений и водообильности в отдельных блоках, на основе которых сделано заключение о низкой рассолообильности комплекса с характерными для него хлоридными натриевыми рассолами с минерализацией до 100 г/л [Алексеев, 2009].

Рис. 3.32. Литологическая колонка центральной части Среднеботуобинского нефтегазоконденсатного месторождения (с уровнями распространения подземных водоносных горизонтов): 1 — известняки; 2 — доломиты; 3 — глинистые доломиты; 4 — доломит-ангидриты; 5 — гравелиты; 6 — песчаники, пески; 7 — мергели; 8 — аргиллиты; 9 — пласты каменной соли; 10 — продуктивный пласт; 11 — кристаллические породы фундамента: граниты и гнейсы; 12 — траппы пермь-триасового времени; 13 — подземные водоносные горизонты: I, II — нижнекембрийский над- и межсолевой соответственно, III — нижнекембрийский подсолевой карбонатный, IV — вендский карбонатный, V — вендский терригенный; 14 — местоположение ПЯВ в геологическом разрезе (6 взрывов на глубине ~ 1500 м в пределах карбонатных пород сокуканской свиты нижнего кембрия, 1 взрыв на глубине 815 м в соляном пласте толбочанской свиты нижнего кембрия)

Надсолевой V водоносный комплекс содержит подземные воды разного состава: от пресных гидрокарбонатных кальциевых, кальциево-магниевых вод с минерализацией 0,5–1 г/л до хлоридных натриевых рассолов с минерализацией до 300 г/л, в распространении спорадических водоносных горизонтов большую роль играет криолитозона. Особенностью водоносного комплекса является содержание в них большого количества сероводорода [Анциферов, 2004].

Выделяются два основных продуктивных горизонта: осинский — у кровли III водоносного горизонта в нижнекембрийских пористо-кавернозных и трещиноватых известняках и доломитах с прослоями аргиллитов сокуканской свиты на глубине примерно 1500 м и ботуобинский — в кровле I водоносного комплекса в вендских песчаниках курсовской свиты на глубине приблизительно 1850–1900 м.

Вопрос причины развития аномально низких пластовых давлений в I и II вендских водоносных комплексах СБНГКМ остается открытым. По мнению ряда авторов [Яковлев, Семашев, 1982, Вожов, 1987, Карцев и др., 1989], уход рассолов по трещинам в фундамент платформы, вероятнее всего, привёл к образованию депрессионной водонапорной системы. Недра СБНГКМ на уровне вендских водоносных комплексов как нельзя хорошо подходят для захоронения РАО даже при условии одновременной добычи нефтепродуктов из приуроченного к этим горизонтам ботуобинского продуктивного пласта [Абукова, Яковлев, 2008; Абукова и др., 2011].

Краткая характеристика техногенеза на территории СБНГКМ. С 1976 по 1987 гг. на территории Среднеботуобинского месторождения было проведено семь подземных ядерных взрывов. Шесть взрывов, каждый мощностью в 15 кт в тротиловом эквиваленте, были проведены на глубине примерно 1500 м, в глинистых доломитах сокуканской свиты, в пределах III подсолевого водоносного комплекса, для повышения нефте- и газопритоков из осинского продуктивного пласта, развитого у кровли данного водоносного комплекса (рис. 3.32). Седьмой взрыв «Нева-4» мощностью 3,2 кт ТЕ был проведён на глубине 815 м в соляном пласте толбочанской свиты нижнего кембрия для создания ёмкости — хранилища нефтепродуктов. На промышленных площадках, за исключением «Нева-4», на расстоянии примерно 100 м друг от друга было подготовлено по две скважины: боевая предназначалась для закладки зарядного устройства и последующего взрыва, вторая скважина — разведочная. Скважины вскоре после взрывов вскрывались для наблюдений и испытательных работ.

К настоящему времени накоплен как обширный экспериментальный материал, так и развиты теоретические модели, позволяющие определить размеры механического воздействия ПЯВ на вмещающие породы [Адушкин, Спивак, 2007]. С помощью экспериментальных формул оценены зоны механического воздействия взрывов на вмещающую геологическую среду. Приведенные глубины заложения зарядов для шести ПЯВ

$$H_{\text{пр}} = H/E^{1/3} = 1500 \text{ м}/15^{1/3} \text{ кт}^{1/3} = 608 \text{ м/кт}^{1/3}$$

и для

$$H_{\text{пр}} = 815/3,2^{1/3} \text{ кт}^{1/3} = 553 \text{ м/кт}^{1/3}$$

обеспечивали типичный камуфлетный взрыв. Несмотря на то, что цементные пробки скважин были подготовлены для каждого взрыва по индивидуальной схеме, все взрывы были проведены в штатном режиме, без выхода радиоактивности на поверхность. Размер полости (её объём или радиус) является одним из основных характеристик действия подземного ядерного взрыва. Для оценок размеров полости воспользовались формулой Родионова [Абукова, Яковлев, 2008] при условии превышения прочности пород на сжатие σ^* (Па) над пластовым давлением ρgH (Па): $\sigma^* > \rho gH$, где ρ — плотность пород, г/см³; g — 9,8 м/с²; H — глубина, м.

Формула [Адушкин, Спивак, 2007] правильно передаёт зависимость радиуса полости от свойств грунта: от прочности на сжатие σ^* и акустической жёсткости ρC_p^2 :

$$R_{\text{полости}} = E^{1/3} \frac{354,6}{(\rho C_p^2 \sigma_{\text{сж}}^*)^{1/9}}, \quad (3.1)$$

где $R_{\text{полости}}$ — радиус полости взрыва, м; E — мощность взрыва, кт ТЭ; ρ — плотность карбонатных пород, г/см³, нами принята равной 2,38 г/см³, C_p — скорость звука, м/с; $\sigma_{\text{сж}}^*$ (σ^*) — прочность пород на сжатие 1000 кг/см² (100 МПа).

Радиус полости взрывов, за исключением ПЯВ «Нева-4», согласно формуле 3.1 составляет от 25,3 до 27,9 м для скорости звука (C_p) от 5400 до 3500 м/с.

Радиус зоны дробления $R_{\text{дроб}}$, равный 54–66 м для шести ПЯВ, получаем по формуле [Адушкин, Спивак, 2007]:

$$R_{\text{дроб}} = R_{\text{полости}} \left(\frac{\rho C_p^2}{4\sigma^*} \right)^{1/3}. \quad (3.2)$$

Радиус зоны трещиноватости, равный 104–126 м, для шести ПЯВ (за исключением «Нева-4») оценен по формуле [Абукова, Яковлев, 2008]:

$$R_{\text{трещин}} = R_{\text{дроб}} \left(\frac{\sigma^*}{2(\sigma_{\text{откол}} + \rho gH)} \right)^{1/2}, \quad (3.3)$$

где $\sigma_{\text{откол}}$ — прочность пород на откол или растяжение, в рассматриваемом случае равна 100 кг/см² (или 10 МПа).

Отметим условность этих зон. В реальности это означает, что в этих зонах происходит нарушение сплошности среды и возникновение блочного иерархического состава разрушенной геологической среды. Выделенные зоны механического разрушения, как правило, имеют асимметричную форму, и максимальные изменения ориентированы в направлении ослабленных участков в массиве. В условиях СБНГКМ было возможно преимущественное движение флюидов при взрыве не только вверх к дневной поверхности и в стороны, но и вниз по разрезу в I и II водоносные комплексы — в сторону аномально низких пластовых давлений.

Высота столба обрушения оценивается в 6–8 $R_{\text{полости}}$ [Адушкин, Спивак, 2007], что с учётом прочностных свойств доломитов и каменной соли, по нашему мнению, составляет от 152 до 223 м. Следует отметить, что размеры столба

обрушения зависят от многих параметров геологической среды и термодинамики продуктов взрыва. По нашим оценкам, на объекте «Нева-1» столб обрушения наиболее близко подходит к подошве траппов — расстояние между ними составляет около 80 м, на объекте «Вятка» расстояние от столба обрушения до траппов составляет всего около 120 м, а для остальных объектов примерно от 220 до 290 м. Эти расстояния имеют важное значение из-за проблемы вероятного возникновения проводящих геоструктур «полость взрыв — столб обрушения — контактные зоны траппов — тектонические разломы — поверхность земли» вследствие проведённых взрывов.

Для ПЯВ «Нева-4», проведённого в соляном пласте, должны быть применены формулы, учитывающие не упругие, а пластические свойства вмещающих пород. По неопубликованным данным Министерства охраны природы Республики Саха (Якутия), расчётный радиус подземной ёмкости составляет примерно 15 м, а ее объём — примерно 9 ± 2 тыс. м³.

К сожалению, нам не доступна информация о реальных размерах зон разрушения геологической среды, полученная при попытках вскрытия боевых скважин. Со времени проведения взрывов добыча углеводородов из осинского продуктивного горизонта не велась (за исключением опытных откачек из разведочных скважин, а также единственной опытной откачки из боевой скважины объекта «Нева-3» и обратной закачки полученных флюидов в подземную ёмкость объекта «Нева-4» в 1989 г.). Полость взрыва ПЯВ «Нева-4» не использовалась по назначению, согласно расчётам, она, вероятнее всего, обвалилась из-за пластичного наплыва солей. По косвенным признакам, приведённым выше, можем судить о том, что эксперименты ПЯВ на СБНГКМ не достигли своей цели и не принесли народнохозяйственного успеха.

Вместе с тем из нижележащего ботубинского продуктивного пласта с всё увеличивающимися объёмами осуществляется добыча нефти с применением технологий нагнетания воды, специальных растворов через кусты скважин для интенсификации притоков нефти. Площадь Среднеботубинского месторождения покрыта сетью из 98 разведочных и добывающих скважин.

В 1990-е гг. во время первого радиоэкологического обследования на буровых площадках объектов ПЯВ «Нева-2» и «Шексна» были выявлены участки земли площадью примерно 30 м² с повышенной радиоактивностью: максимальные мощности экспозиционной дозы γ -излучения составили 65 и 240 мкР/ч соответственно. Радиоактивные участки образовались в результате слива на поверхность загрязнённого бурового шлама при вскрытии боевых и разведочных скважин после взрывов [Данилов, 2004]. Закономерное концентрическое распределение плотности потоков радона вокруг боевых скважин объектов ПЯВ «Нева-1» (скв. 66) и «Вятка» (скв. 43) позволило сделать вывод о развитии вокруг них концентрических ослабленных проницаемых зон [Ковалев, Ложников, 2004].

В результате анализа геологической ситуации авторы [Микуленко, Буйдылло, 2004, Микуленко и др., 2006] сделали заключение о неудачном расположении объектов ПЯВ на СБНГКМ — рядом с тектоническими разрывами, активизировавшимися в современную эпоху. Гамма-каротаж геологоразведочных скважин, расположенных близко к объектам ПЯВ, выявил после ПЯВ слабую тенденцию повышения радиационного фона горных пород на несколько десятых

долей микрорентген в час [Микуленко и др., 2006], на основании которой сделано предположение о возможном выходе радионуклидов из полостей взрывов и их распространении в геологической среде, в том числе вследствие возможного динамического влияния зон тектонических разрывов. Для более уверенного подтверждения этого предположения К. И. Микуленко указал на необходимость радиоэкогеохимического изучения подземных флюидов района СБНГКМ (подземных вод, нефти и газов). По сути, наша работа является продолжением идеи К. И. Микуленко: путём изучения состава поверхностных вод района СБНГКМ (доступных для пробоотбора) подтвердить или опровергнуть поступление радионуклидов из подземных источников — полостей ПЯВ в геологическую среду и далее — на поверхность земли.

Нами исследования на территории Среднеботуобинского месторождения и расположенных там объектов ПЯВ проводились летом 2010 г. В результате их изучения было выявлено, что на терригенных четвертичных и юрских подстилающих породах при отсутствии населения и промышленных предприятий в районе формируются практически ультрапресные нейтральные поверхностные воды с минерализацией от 14,3 до 98,7 мг/л с нормальной до слабощелочной среды: рН — от 6,96 до 7,46, по составу — сульфатные магниевые-кальциевые.

Минерализация вод формируется в основном за счет сульфатов, катионов кальция и магния. Сера — один из типоморфных макроэлементов местных заболоченных ландшафтов, которая, вероятно, поступает в виде сероводорода из подстилающих пород и окисляется до сульфат-ионов в поверхностных условиях. Среднее содержание сульфатов в поверхностных водах СБНГКМ составляет 24,8 мг/л, наиболее богаты сульфатами воды реки Тэлгэспит — в среднем 47,5 мг/л, болотистой реки Кудулах — в среднем 50,3 мг/л. В условиях быстрого течения и меньшей заболоченности реки Тас-Юрях количество сульфатов уменьшается до 12,9 мг/л, в реке Улахан-Ботубуйа их содержание ещё меньше — всего от 6,2 до 7,5 мг/л, возможно вследствие большего разбавления. Несмотря на доминирование сульфатов в анионном составе, преобладание катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} обеспечивает сохранение нейтральной и слабощелочной среды поверхностных вод. Среднее содержание основных катионов в речной воде СБНГКМ составляет, мг/л: Ca^{2+} — 22,6; Mg^{2+} — 6,1, Na^+ — 3,64; K^+ — 0,19.

Поверхностные воды на промышленных площадках объектов ПЯВ отбирались из стаканов для буровых снарядов, амбаров — запруд, созданных для хранения бурового шлама, из маленьких ручейков и водоёмов — термокарстовых озёр, развитых в ложбинах полигональных бугров. Все пробы с площадок ПЯВ, за исключением одной пробы из озера у площадки объекта «Вятка», резко отличаются от состава речной воды района исследования. Этим пробам характерна более высокая минерализация: максимальная — около 2 г/л, средняя — 552 мг/л за счёт увеличения концентраций хлоридов натрия, кальция и магния при широком диапазоне содержания сульфатов. Проба из озера на площадке объекта «Вятка» по составу практически идентична речной воде: её минерализация составляет всего 58 мг/л, тип вод — сульфатный натриево-кальциевый. В остальных водных пробах с площадок ПЯВ среднее содержание катионов составляет, мг/л: Na^+ — 107, Ca^{2+} — 69, Mg^{2+} — 20, K^+ — 3,6, что превышает их среднее содержание в речной воде в 29, 3, 3, 19 раз соответственно. Максимальное содержание катионов достигает, мг/л: Na^+ — 346, Ca^{2+} — 315,

Mg^{2+} — 138, K^+ — 14,9, что также превышает среднее содержание в речной воде в 95, 14, 23, 78 раз соответственно.

Поверхностные воды на площадках ПЯВ относятся к разным типам пресных и солоноватых вод, особенно гетерогенны пробы на площадке объекта «Ока». Здесь, вследствие интенсивного термокарста, образовался полигонально-холмистый («байджараховый») микрорельеф, в сети ложбин которого наблюдаются небольшие озёрца и ручейки. Пробы из расположенных рядом водоёмов, как оказалось, сильно различаются по составу и относятся к совершенно разным геохимическим типам: хлоридным кальциевым, хлоридным натриевым и сульфатно-хлоридным кальциевым и их промежуточным разностям.

Как ранее отмечали, местной геологической среде присущи подземные рассолы: 1) хлоридные натриевые из над- и межсолевого водоносных комплексов; 2) глубокометаморфизованные хлоридные кальциевые и натрий-кальциевые из подсолевых водоносных комплексов [Алексеев, 2009]. По-видимому, по ослабленным зонам боевых и разведочных скважин на поверхность просачиваются рассолы разного состава из разных глубин. Их смешение с поверхностными водами формирует на площадке объекта «Ока» наблюдаемое разнообразие химического состава поверхностных вод. Наличие в поверхностных условиях хлоридных магниево-кальциевых, натриево-кальциевых вод указывает на постоянный свежий выход на поверхность глубинных метаморфизованных рассолов из подсолевого водоносного комплекса, содержащих тритий (рис. 3.33). Хлоридные чисто натриевые типы поверхностных вод указывают на просачивание рассолов из меж- и надсолевого водоносного комплексов, расположенных выше в геологическом разрезе.

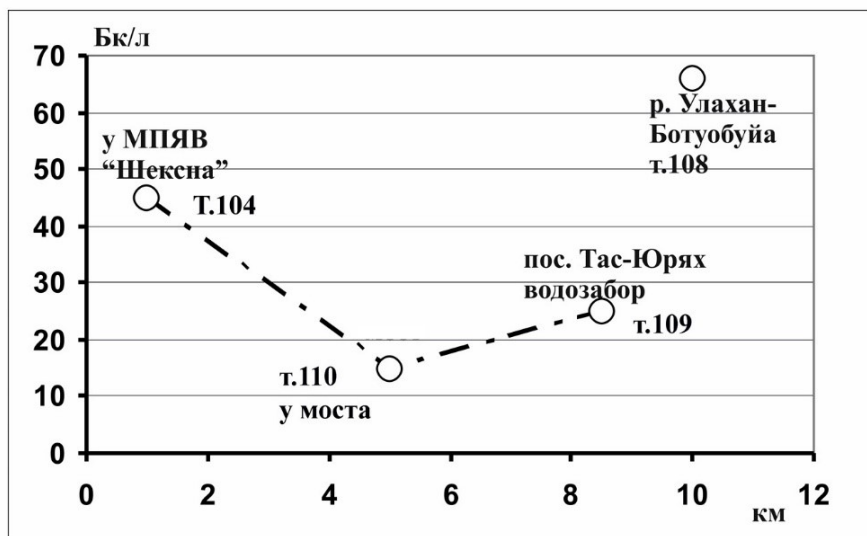


Рис. 3.33. Содержание трития в воде рек Улахан-Ботубуй и Тас-Юрях по мере удаления от объекта ПЯВ «Шексна» в 2010 г. (точки отбора проб см. рис. 3.31)

Пробы, отобранные на площадках других объектов ПЯВ СБНГКМ, также различны по составу: полностью хлоридные натриевые воды характерны пробам с площадки объекта «Шексна» и из стакана для бурового снаряда разведочной

скважины объекта «Нева-3», а сульфатно-хлоридные, хлоридно-сульфатные кальциевые — пробам с площадок объектов «Вятка» и части проб с площадок объектов «Ока» и «Нева-3». Минерализация сульфатно-хлоридных и хлоридно-сульфатных кальциевых вод не более 231 мг/л, и при формировании макросоставов этих типов вод основной тон задают, по-видимому, пресные поверхностные сульфатные магниевые-кальциевые воды, нежели подземные хлоридные натриевые или кальциево-натриевые рассолы.

В водных пробах площадок ПЯВ концентрации: В — до 94 мкг/л (среднее содержание — 38), Ва — до 443 мкг/л (среднее содержание — 131), что выше их средних концентраций в речной воде в 9 и 23 раза соответственно. Это типоморфные элементы подземных рассолов, и потому их высокие содержания в водных пробах площадок ПЯВ, наряду с хлоридами натрия, кальция, магния, более чем логичны.

Высокое содержание Fe (до 20 мг/л), Mn (до 0,83 мг/л) в водных пробах стаканов для буровых снарядов можно объяснить локальным влиянием самих этих железных конструкций. Однако высокие содержания Fe (до 12,1 мг/л) и Mn (до 5,23 мг/л) в ручейках и термокарстовых озерах площадок ПЯВ мы можем объяснить только выходом подземных потоков, несущих вещество с этими элементами из глубинных участков скважинного оборудования.

С помощью ICP-AES в водных пробах площадок ПЯВ зафиксированы металлы, совершенно чуждые геохимии местных природных ландшафтов, мкг/л: Со — до 19; Cr — до 54; Cu — до 32; Ni — до 150; Ti — до 32; V — до 30; Zn — до 57. Наличие Cr не свойственно для поверхностных вод района распространения терригенных и карбонатных осадочных пород. В пробах воды площадок объектов «Нева-3» и «Шексна» установлены высокие концентрации редких элементов, мкг/л: Be — до 1,9; La — до 6,7; Y — до 6,6.

Подземные рассолы обогащены Li, Sr, Rb, K, J, Br, В, Mn, Ca, Mn [Анциферов, 1989, 2004], и выявленный в поверхностных водах площадок ПЯВ комплекс редких элементов и металлов не совпадает с вышеприведённой геохимической группой элементов, связанных с рассолами. По нашему мнению, Со, Cr, Cu, Ni, Ti, V, Zn, Be, La, Y в поверхностных водах площадок ПЯВ имеют техногенное происхождение и являются остатками оборудования, материалов и, возможно, продуктов взрыва, выносимых подземными потоками на поверхность по ослабленной зоне вокруг боевой скважины. В речной воде СБНГКМ редкие элементы — La, Y, Be, Ni, Со, V, Cr — нами не обнаружены, их содержания в речной воде ниже пределов обнаружения, поскольку у них очень низкая способность к водной миграции, в нормальных окислительных условиях они быстро осаждаются в виде комплексных гидроксидных соединений.

С помощью ICP-MS выявлено, что в поверхностных водах площадок ПЯВ наблюдаются резкие скачки содержания U в 20 раз — до 1,8 мкг/л при его среднем содержании в речной воде района приблизительно 0,09 мкг/л. Вода в термокарстовом водоёме площадки объекта «Шексна» обогащена изотопом ^{235}U при валовой концентрации урана в 0,94 мкг/л, что привело к смещению изотопного соотношения $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ с обычного, природного — 137,88, до 128. По нашему мнению, данное явление обусловлено выходом флюидов из полости взрыва, где среди особых ядерных отходов вполне логично ожидать наличие оружейного урана-235, и просачиванием на поверхность Земли вместе

с напорными подземными рассолами по ослабленной зоне вокруг боевой скважины.

Формы нахождения трития в полости взрыва не освещены в открытой печати. В поверхностных условиях тритий находится преимущественно в виде молекулы воды $^3\text{H}_2\text{O}$ [Рихванов, 2009]. Форма его нахождения в виде воды обуславливает его высокую подвижность и возможность его использования в качестве индикатора водного переноса техногенных радионуклидов из полостей взрывов ПЯВ. В ходе наших радиоэкологических исследований объектов ПЯВ особое внимание придавалось именно тритию, что даже введено понятие тритиевой съёмки, которая включает массовый отбор проб природных вод для определения в них содержания трития.

С помощью жидкостно-сцинтилляционной спектрометрии в водных пробах 2010 г. было выявлено, что не только поверхностные воды на площадках ПЯВ, но и практически вся речная вода района СБНГКМ отличались высоким содержанием трития. Средняя активность трития в поверхностных водах СБНГКМ составляет 51,1 Бк/л. В водных пробах площадок ПЯВ трития больше: его максимальная активность составила 170 Бк/л в пробе из стакана боевой скважины 42 на площадке объекта ПЯВ «Ока», что в 34 раза превышает глобальный фон трития в поверхностных водах, оцениваемый примерно в 5 Бк/л в начале 2000 г. [Рихванов, 2009]. В термокарстовых водоёмах площадки объекта «Ока» также были выявлена повышенная активность трития — до 50 Бк/л.

Высокие концентрации трития не только в воде буровых площадок, но и в целом во всех водотоках района СБНГКМ, по-видимому, указывают на выход техногенных радионуклидов из полостей взрывов ПЯВ — и не только через ослабленные зоны вокруг боевых скважин, но и по зонам тектонических разломов, широко развитых в районе (см. рис. 3.31).

В речной воде также изучали содержание изотопов Pu и ^{90}Sr . Содержание радиостронция составило от 0,006 Бк/л, максимальное — до 0,057 Бк/л, что превышает региональный фоновый уровень почти на порядок. Региональный фон ^{90}Sr в поверхностных водах бассейна рек Обь — Теча в 2004–2005 гг. составлял 0,005 Бк/л [Крышев, Сазыкина, 2009].

В реке Тэлгэспит, ниже по течению от объектов ПЯВ «Нева-2,3,4», примерно в 1 км, концентрации $^{239,240}\text{Pu}$ составляют $4,5 \cdot 10^{-4}$, ^{238}Pu — $6,3 \cdot 10^{-4}$ Бк/л. По мере удаления от объекта ПЯВ «Шексна» концентрации радионуклидов, за исключением радиостронция, снижаются: в реке Тас-Юрях, рядом с объектом Шексна (т. 104), трития — 45 Бк/л, $^{239,240}\text{Pu}$ — $6,4 \cdot 10^{-4}$ Бк/л, ^{238}Pu — $9,1 \cdot 10^{-4}$ Бк/л, а в 7,5 км ниже по течению, у пос. Тас-Юрях (т. 109), на участке питьевого водозабора, они снижаются примерно в 2, 4 и 4 раза соответственно. По имеющимся результатам экспериментов [Migration of plutonium..., 1999], изотопы Pu, несмотря на свою низкую способность переходить в раствор, способны к водной миграции на дальние расстояния: оказывается, они преимущественно оседают на мелкодисперсных частицах, образуют коллоиды и в таком виде переносятся подземными и поверхностными водными потоками.

Несмотря на то, что расход самой крупной в районе реки Улахан-Ботуобуйа превышает расходы других водотоков (её же собственных притоков) в десятки и более раз, в ней (см. рис. 3.32, т. 108) сохраняются (и даже увеличиваются) уровни содержания техногенных радионуклидов, Бк/л: ^3H — 66; $^{239,240}\text{Pu}$ — $5,1 \cdot 10^{-4}$; ^{238}Pu — $1,4 \cdot 10^{-3}$. Явственно наблюдается отсутствие эффекта разбавления. Проба

отобрана в 4,3 км выше устья реки Тас-Юрях, так что радионуклиды сюда не могли попасть вместе с поверхностным стоком реки Тас-Юрях. Источником техногенных радионуклидов в реку Улахан-Ботубуйа может быть полость взрыва «Шексна», как и полости других ПЯВ района, при наличии подземного подводящего проводника, например, при просачивании радионуклидов с напорными подземными водами по трещиноватым зонам тектонических разломов.

Появление высокого содержания трития в 108 Бк/л в ручье на верховье реки Тэлгэспит, в 3,5 км выше по течению от объектов ПЯВ, мы также не можем объяснить поступлением радионуклидов по прискважинной ослабленной зоне (поскольку здесь нет объектов ПЯВ) или привнесом поверхностными стоками реки (поскольку получается против течения), если только не допустить вариант просачивания радионуклидов из подземных источников по проводящим геологическим структурам, возможно, по системам «полость взрыва — столб обрушения — тектонические разломы» или «полость взрыва — столб обрушения — тектонические разломы — контактные зоны траппов — тектонические разломы» и другим вариантам сочетания проводящих геоструктур. На рис. 3.32 приведена одна из последних тектонических схем разломов района СБНГКМ. Тектонические дислокации взбросо-надвигового типа и сопутствующих им пликвативных структур разбивают район на ряд блоков. Практически все объекты ПЯВ были произведены вблизи разломных зон, особенно объект «Шексна» практически «сидит» на разломе регионального масштаба. Взрывы могли приоткрыть разломные зоны, по которым загрязнённые радионуклидами напорные рассолы подсолевого III водоносного комплекса (с пластовым давлением до ~30–32 МПа) могли начать просачиваться вверх. В районе СБНГКМ выше на 300–400 м от полостей шести ПЯВ расположено интрузивное тело пластовых траппов, трещиноватые контактные зоны которых при установлении гидравлической связи с полостями взрывов могут служить проводниками радиоактивных флюидов по геологической среде и способствовать их выходу на дневную поверхность. Данное заключение подкрепляется повсеместно высокими концентрациями трития в водотоках района, включая многоводную реку Улахан-Ботубуйа и ручеек в верховье Тэлгэспит вдали от объектов ПЯВ.

На примере проб воды площадок объектов «Ока», «Нева-3», «Шексна» показано, что техногенно ослабленные прискважинные зоны, по-видимому, являются самыми короткими проводящими путями для выхода радионуклидов на дневную поверхность. Здесь мы зафиксировали не свойственные природным поверхностным водам высокие концентрации урана, редких иттрия, бериллия, редкоземельного лантана, металлов (хром, кобальт, никель и др., которые мы связываем, несомненно, с подземным техногенным источником — остатками материалов взрывного изделия, сопутствующего оборудования, продуктов взрыва. Установлен факт существенного смещения изотопного соотношения $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$, что дополнительно подтверждает наше заключение. По ослабленным прискважинным зонам поступают на дневную поверхность напорные подземные солёные воды из разных горизонтов геологического разреза, на это указывает макрокомпонентный состав водных проб площадок объектов ПЯВ. По-видимому, глубинные метаморфизованные кальциевые, кальциево-натриевые рассолы и расположенные выше натриевые рассолы по ослабленной прискважинной зоне просачиваются независимо друг от друга, а по пути захватывают радиоактивные флюиды с техногенными редкими элементами и металлами.

При старении оборудования скважин, деформации и разрушении цементных пробок, дальнейшем трещинообразовании и деградации мерзлоты в зоне боевых скважин, значит и подвижек пород, не только сами эти ослабленные прискважинные зоны, но и собственно стволы скважин (колонна и заколонное пространство) могут стать проводниками радиоактивности в поверхностные системы. По результатам обследования 2010 г. наиболее критичной признана ситуация на объекте ПЯВ «Ока». Здесь на буровой площадке активно идут термокарстовые процессы, деградация мерзлоты привела к таянию полигонально-жильных льдов и развитию на площадке крупно- и мелкополигонального холмистого («байджарахового») рельефа с развитием полостей и трещин в их ложбинах, в которых собираются выходящие на поверхность подземные радиоактивные солёные воды.

Вторым по критичности признано положение на объекте «Нева-1», где наблюдаются интенсивные склоновые эрозионные процессы. Необходимо отметить скважину № 101 («Нева-4») как объект, который нуждается в безотлагательном техническом изучении: в ходе полевых работ установлено, что через её устьевое оборудование идёт истечение газов (определено по запаху). Герметичность подземной ёмкости объекта «Нева-4» в пласте каменной соли остается невыясненной, поскольку на его площадке отсутствовали водоёмы для проведения отбора проб, а его близкое соседство с двумя другими объектами ПЯВ не дало возможности выделить потоки техногенных радионуклидов в пробах реки Тэлгэспит. Для выяснения вопроса герметичности подземной ёмкости требуется целенаправленный проботбор флюидов из скважин, расположенных в окрестностях объекта «Нева-4».

Результаты радиоэкогехимических исследований на СБНГКМ показали, что в целом системы «полость ПЯВ — геологическая среда — поверхность Земли» являются открытыми, при этом проводниками радиоактивных флюидов из глубинных подсолевых горизонтов на поверхность Земли, возможно, служат естественные геоструктуры тектонических разломов, контактных зон траппов, а также техногенные геоструктуры ослабленных прискважинных зон, столбов обрушения, сеть старых брошенных эксплуатационных и геологоразведочных скважин и проч. Многослойные мощные пласты каменной соли, отличающиеся пластичностью, непроницаемостью для флюидов и обладающие свойством залечивания старых и вновь возникающих трещин и разломов, хотя и перекрывают сверху полости шести ПЯВ, но, как оказалось, в реальных условиях Среднеботубинского месторождения не препятствуют выходу радиоактивных флюидов с подземными напорными рассолами на поверхность. Возможно, выходу на дневную поверхность радиоактивных флюидов способствует современное техногенное воздействие на гидродинамический режим СБНГКМ, оказываемое при добыче нефтепродуктов из ботубинского продуктивного горизонта. Чтобы выяснить пригодность вендских водоносных комплексов с аномально низкими пластовыми давлениями для захоронения РАО, необходимо целенаправленное изучение флюидов этих комплексов и приуроченного к ним ботубинского продуктивного пласта. По нашему мнению, вероятен переток в эти глубинные горизонты радиоактивных флюидов из вышерасположенного III нижекембрийского водоносного комплекса

с более высокими пластовыми давлениями (как и взаимоперетока флюидов между этими водными комплексами).

В воде реки Тас-Юрях, которую жители одноименного поселка используют в питьевых целях, нами установлены техногенные радионуклиды в концентрациях, превышающих фоновые уровни, но намного ниже существующих уровней вмешательства (Нормы радиационной..., 2009). Точечное опробование не дает полной картины существующей ситуации, и необходимость регулярного (ежемесячного) радиоэкологического мониторинга качества питьевой воды пос. Тас-Юрях не подлежит сомнению.

Таким образом:

1. На основе радиоэкогеохимического изучения поверхностных вод СБНГКМ выявлено, что, несмотря на штатный режим проведения ПЯВ, геотехногенные системы «полость взрыва — вмещающая геологическая среда — дневная поверхность» являются открытыми системами. Из полостей взрывов техногенные радионуклиды ^3H , $^{238,239,240}\text{Pu}$, ^{90}Sr , $^{235,238}\text{U}$ и микроэлементы Co, Ni, Ti, V, Cr, La, Y, Be поступают в поверхностные водотоки и водоемы.

2. Наличие в районе Среднеботуобинского месторождения высоконапорных подземных рассолов до 32 МПа, по-видимому, поспособствовало миграции радионуклидов вместе с ними по проводящим геоструктурам к поверхности Земли. Появление высоких концентраций макрокатионов Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} и хлоридов в пробах поверхностных вод буровых площадок объектов ПЯВ подтверждает этот вывод.

3. Одним из основных проводников радиоактивности на дневную поверхность служат техногенные геоструктуры, а именно ослабленные зоны вокруг боевых скважин. Со старением оборудования скважин выход радионуклидов по этому проводнику, по-видимому, будет усиливаться. Деградация мерзлоты, развитие полигональной сети таликов (на поверхности выражающихся в виде полигональных холмов и термокарстовых ложбин) скорее способствуют процессам переноса радионуклидов из глубин к поверхности Земли.

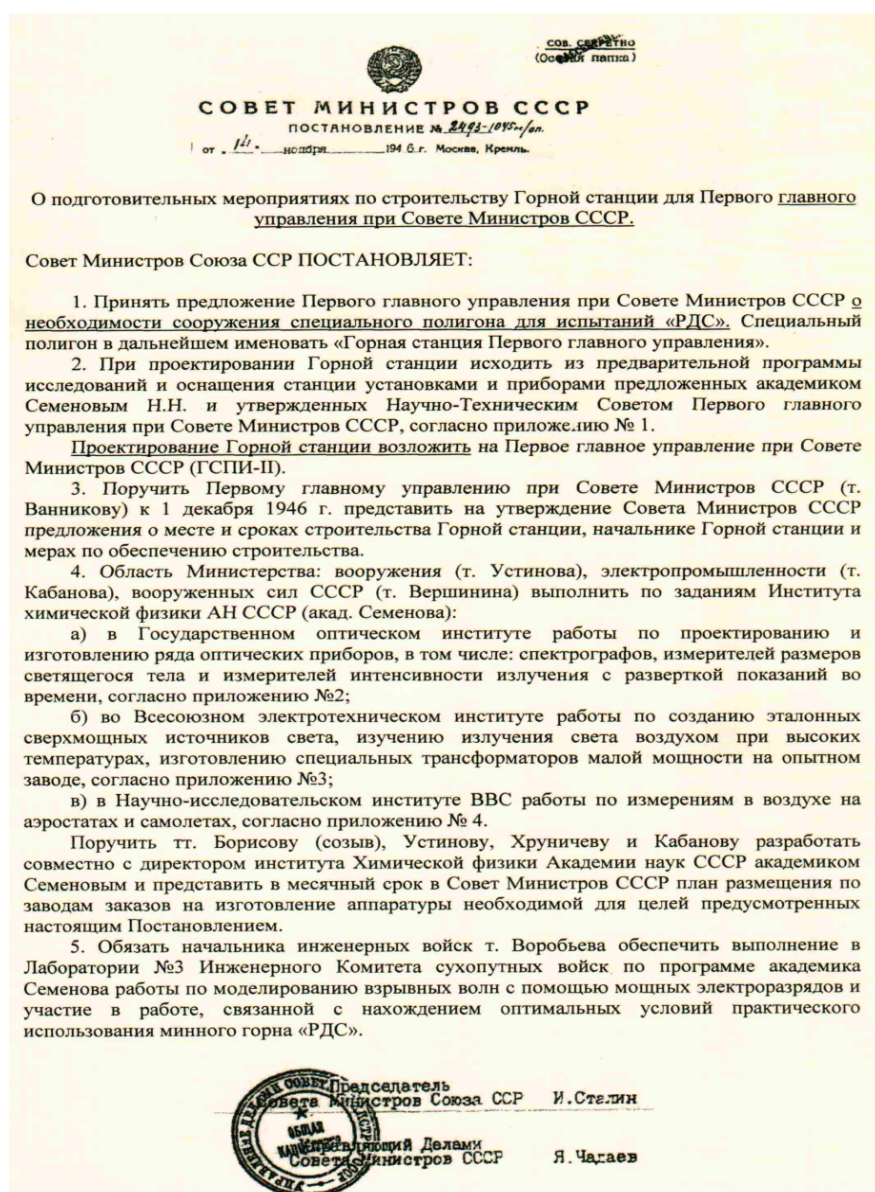
4. Вторым основным видом проводников радиоактивности в геологической среде являются естественные геологические структуры, а именно зоны тектонических разломов, которые, в свою очередь, могли дополнительно раскрыться вследствие механического воздействия взрывов. Наличие активности изотопов ^3H , ^{90}Sr , $^{238,239,240}\text{Pu}$, превышающей глобальный уровень приблизительно в 10 и более раз, в пробах водотоков района вдали от объектов ПЯВ и отсутствие эффекта разбавления концентраций этих радионуклидов в самом крупном водотоке района — реке Улахан-Ботубуйа, по-видимому, указывает на то, что они просачиваются на дневную поверхность через разломные зоны.

5. Контактные трещиноватые зоны пластовых траптовых тел также могут быть проводником радионуклидов в геологической среде и способствовать выходу радионуклидов на дневную поверхность.

6. Повсеместное распространение трития в поверхностных водах района СБНГКМ с активностью, превышающей глобальный уровень до 30 раз, по-видимому, обусловлено уникально высокой подвижностью трития, что делает его индикатором переноса радионуклидов в системе ««полость ПЯВ — вмещающая геологическая среда — дневная поверхность»».

РАЗДЕЛ 4. СЕМИПАЛАТИНСКИЙ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ПОЛИГОН, РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

Август 1945 г. известен прежде всего атомной бомбардировкой японских городов Хиросима и Нагасаки. Сразу после этого судьбоносного события в СССР насторожились и создали специальный комитет «руководства всеми работами по использованию внутриатомной энергии урана» при Государственном комитете обороны. Во главе комитета встал Лаврентий Берия, а работы над атомным «изделием» вели ведущие учёные, в том числе Игорь Курчатов, Юрий Харитон и Пётр Капица.



Работы по созданию атомного оружия велись и раньше, но с тех пор, как смертельное оружие появилось в распоряжении США, потребность появления советского аналога стала жизненно необходимой.

«Все разговоры о том, что какие-то сведения о ядерном взрыве были добыты у американцев, являются абсолютной чепухой. Ничего, кроме газетных статей, в которых попадались сведения о том, какие поражающие эффекты взрыва наблюдались в Хиросиме и Нагасаки, у нас не было, и наша задача заключалась в том, чтобы, основываясь на общих положениях науки и отрывочных газетных данных, попытаться восстановить количественную картину атомного взрыва», — вспоминал Михаил Садовский, первый научный директор Семипалатинского полигона.

Гонку со временем советские специалисты выиграли, но открытым оставался вопрос о месте испытания атомной бомбы.

Будущий театр советских ядерных испытаний — Семипалатинский ядерный полигон — был создан по решению Совета Министров СССР от 21 августа 1947 г. и стал вторым крупнейшим ядерным полигоном на Земле и четвёртым ядерным арсеналом в мире. Для строительства полигона была выбрана площадка в районе реки Иртыш (рис. 4.1). Подобная локация была выбрана не случайно: в районе пустынной степи в радиусе до 100 км отсутствовали населённые пункты, а территория отличалась крайне низкой плотностью населения. Для того чтобы все было по регламенту, советские власти даже переселили 138 человек из села Малдары, располагавшегося неподалеку от полигона. Определённую проблему представляло то, что в самом городке Семипалатинск находилось консульство КНР, но вскоре его также удалось переместить. В пригороде Семипалатинска Жана-Семей располагался аэродром, которым мог пользоваться полигон.

При участии 15 тысяч строителей полигон возвели за два года. Первое испытание ядерного оружия в Советском Союзе было проведено 29 августа 1949 г. в 07:00. «Отец» советской атомной бомбы — Игорь Курчатов руководил испытаниями на Семипалатинском полигоне с 1949 по 1955 гг. На испытание первой атомной бомбы в 1949 г. приезжал лично Л. П. Берия, курировавший ядерную программу СССР.

Для ядерных экспериментов было отведено 18 500 км² земель, относящимся к территориям Семипалатинской, Павлодарской и Карагандинской областей. На географических картах Семипалатинский полигон не обозначался (рис. 4.2), из-за секретности ему часто меняли названия: Москва-400, Семипалатинск-21, Конечная, Курчатов. Центральной частью полигона было опытное поле, в центре которого была возведена стальная башня высотой 37 м: именно на неё и положили для подрыва первое ядерное устройство — РДС-1. 29 августа 1949 г. СССР в рамках операции «Первая молния» успешно испытал на Семипалатинском полигоне свою первую атомную бомбу мощностью 22,4 кт. Испытание первой водородной бомбы было осуществлено на высоте 1500 м 22 ноября 1955 г. [Семипалатинский..., 2017].

По прошествии четырёх лет здесь же испытали первую термоядерную бомбу, сила взрыва которой достигала 400 кт: бомба была в 26 раз мощнее той, что США сбросили на японскую Хиросиму. В целом суммарная мощность ядерных зарядов, испытанных за 1949–1963 гг., в 2 500 раз превысила мощность атомной бомбы, сброшенной на Хиросиму.

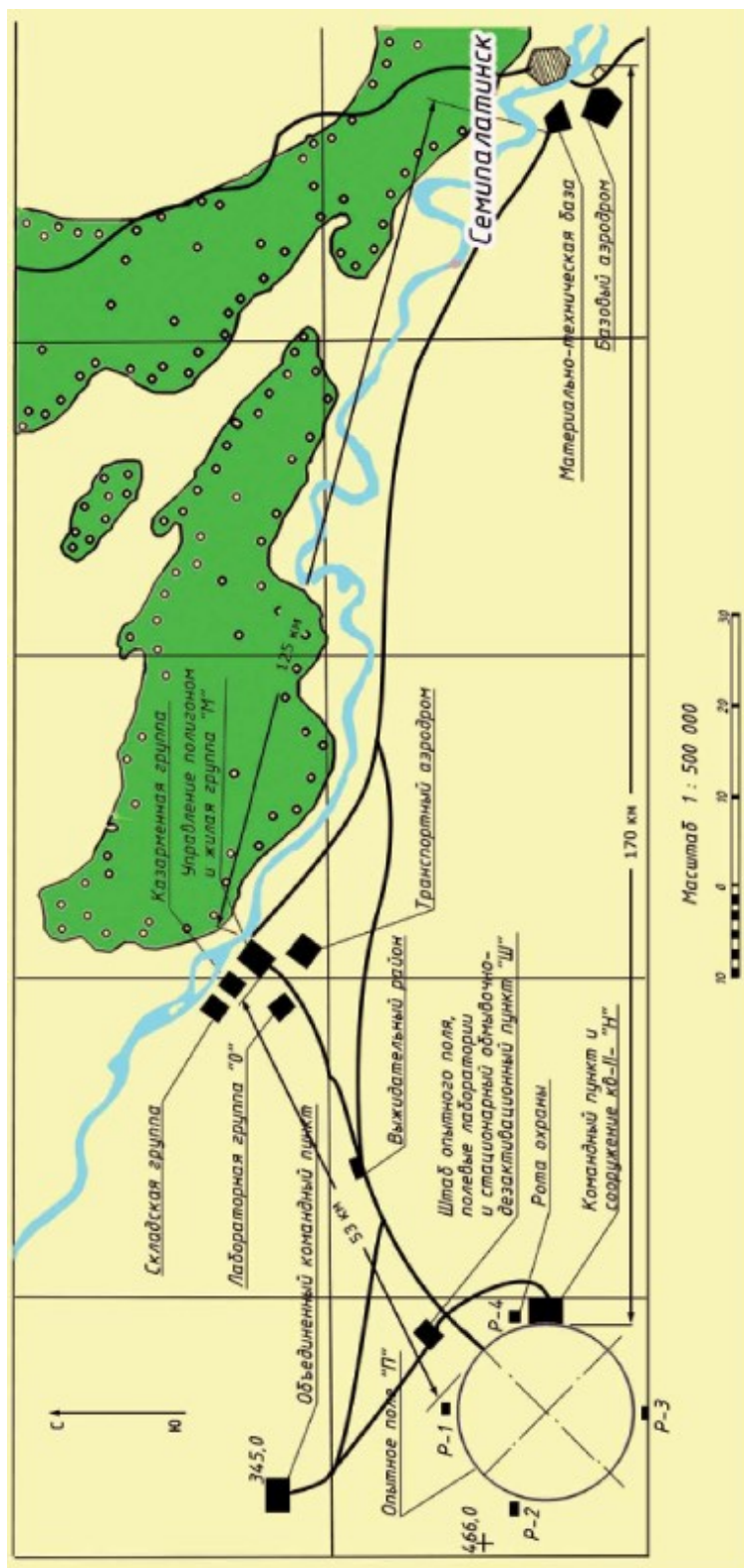


Рис. 4.1. Площадка, выбранная для строительства Семипалатинского полигона

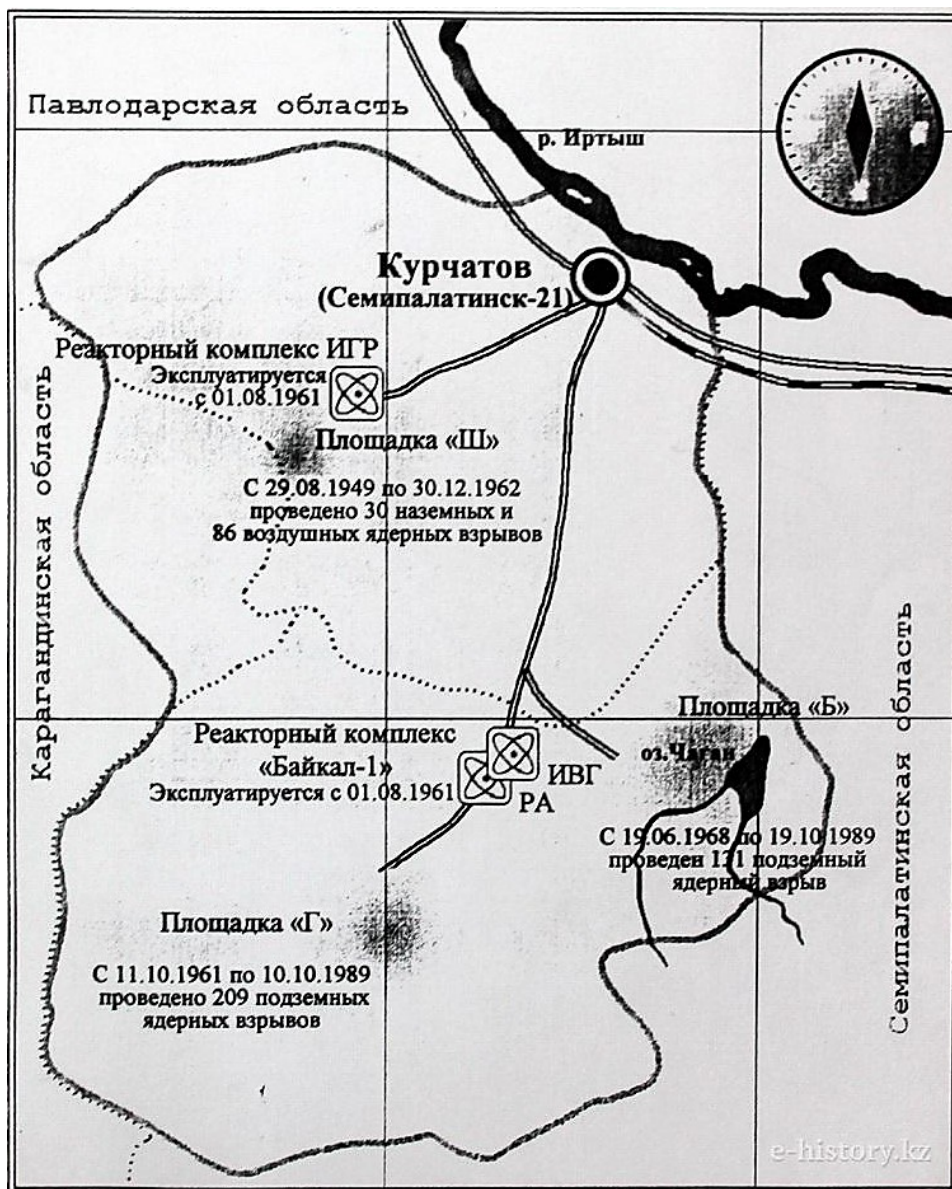


Рис. 4.2. Схема расположения Семипалатинского испытательного полигона [Семипалатинский..., 2017]

Две трети всех советских испытаний (468 ядерных взрывов) проводились именно на Семипалатинском ядерном полигоне.

Наземные и воздушные испытания ядерного оружия на Семипалатинском полигоне проводились вплоть до 1963 г., когда СССР вместе с США и Великобританией подписали Договор о запрещении испытаний в атмосфере, космическом пространстве и под водой. Впрочем, это не помешало Советскому Союзу начать проводить подземные ядерные взрывы, первый из которых был произведён 11 октября 1961 г. — ещё до подписания Договора [Семипалатинский..., 2017].

Для осуществления подземных ядерных взрывов в штольнях в горном массиве Дегелен, находившемся примерно в 100 км южнее административно-жилой зоны полигона, были освоены пять площадок, на которых была создана достаточно густая сеть из 181 горизонтальной штольни. Всего в этих штольнях было проведено 209 испытаний, в рамках которых были взорваны 223 ядерных заряда. При этом с наибольшей интенсивностью ядерные испытания в штольнях проводились в 1965 и 1978 гг. — по 13 взрывов. Максимальное число зарядов, подорванных в одной штольне, равнялось 5.

«Атомное озеро» находится на испытательной площадке «Балапан», оно образовалось в результате подрыва термоядерного боезаряда мощностью в 140 кт в 1965 г. Диаметр озера составляет 500 м, глубина от поверхности воды до дна — 80 м. Вода в озере чистая, в нём водится рыба, но по уровню излучения оно фактически приравнивается к радиоактивным отходам: 1 мкЗв/час, что превышает норму в 114 раз. Это было одно из первых использований атомного взрыва в гражданских целях.

Помимо испытаний самих зарядов, в СССР изучали воздействие взрывов на грунтовые массивы и подземные выработки. Последний взрыв на территории полигона был произведен 19 октября 1989 г. К тому моменту полигон уже давно превратился в своего рода научно-испытательный комплекс, центром которого был город Курчатов с лабораторно-экспериментальной базой, который в разные времена называли Москва-400, Берег или Семипалатинск-21.

Возможно, работы на полигоне продолжились бы и сегодня, если бы в 1989 г. не произошёл выброс радиоактивных газов на поверхность после испытания, что стало причиной создания антиядерного движения «Невада — Семипалатинск», прекращения ядерных испытаний на полигоне в 1989 г. Официально полигон был закрыт в августе 1991 г. решением Правительства Казахстана [Семипалатинский..., 2017]. В 1995 г. уничтожен последний ядерный заряд на бывшем Семипалатинском полигоне, а в 2000 г. — последняя штольня для ядерных испытаний.

Несмотря на это, на полигоне до сих пор живут люди, правда, уже не приезжие испытатели, учёные и военные, а коренные жители, которые используют большую часть земель полигона для выпаса скота. После распада СССР население города Курчатова сократилось в 10 раз, многие объекты полигона заброшены или разрушены.

Безусловно, проведение такого количества взрывов, испытаний атомного оружия не могло не сказаться на здоровье людей и на состоянии экологической ситуации в регионе. К сожалению, на протяжении более 40 лет всякая информация о полигоне замалчивалась, радиационную карту испытаний населению не представляли и результаты после каждого испытания не были обнародованы. Медицинское обследование и лечение населения тоже не проводилось, рост заболеваемости, особенно радиационных, онкологических, психических, высокий процент материнской и детской смертности объясняли состоянием общей экологии, что выглядело весьма неубедительно, поскольку в самом городе Семипалатинске и в области отсутствовали и отсутствуют биохимические, металлургические заводы и производства тяжёлой промышленности, в основном загрязняющие атмосферу, окружающую среду.



**УКАЗ
ПРЕЗИДЕНТА КАЗАХСКОЙ СОВЕТСКОЙ
СОЦИАЛИСТИЧЕСКОЙ РЕСПУБЛИКИ**

О закрытии Семипалатинского испытательного ядерного полигона

На территории Казахской ССР и Семипалатинской области с 1949 года осуществлялись испытания ядерного оружия. За это время здесь было произведено около 500 ядерных взрывов, которые нанесли урон здоровью и жизни тысяч людей.

Учитывая, что Казахская ССР выполнила свой долг по созданию ядерного потенциала, обеспечившего стратегический военный паритет между СССР и США, и, принимая во внимание требования общественности республики, постановляю:

1. Закрыть Семипалатинский испытательный ядерный полигон.
2. Кабинету Министров Казахской ССР по согласованию с Министерством обороны СССР и Министерством атомной энергетики и промышленности СССР преобразовать Семипалатинский испытательный полигон в союзно-республиканский научно-исследовательский центр. В 1991 году разработать и утвердить его статус и перечень основных направлений научно-исследовательских работ.
3. Учитывая, что при проведении воздушных и наземных испытаний с 1949 по 1962 годы нанесен ущерб здоровью населения районов, прилегающих к Семипалатинскому полигону, совместно с союзными органами определить размеры и порядок компенсационных выплат пострадавшим гражданам Казахской ССР.
4. Кабинету Министров Казахской ССР совместно с союзными министерствами и ведомствами, причастными к проведению ядерных взрывов на территории республики, утвердить программу социально-экономического развития, улучшения условий жизни и медицинского обслуживания населения районов Семипалатинской, Карагандинской и Павлодарской областей, прилегающих к испытательному полигону, с привлечением на указанные цели средств соответствующих союзных источников.

Настоящий Указ вступает в силу с момента его принятия

**Президент
Казахской Советской
Социалистической
Республики**

Н. Назарбаев

Алма-Ата, 29 августа 1991 г.

В настоящее время проблема тритиевого загрязнения водных экосистем — одна из главных в радиоэкологии в прилегающих территориях бывшего Семипалатинского испытательного ядерного полигона. Это обусловлено отсутствием надежных систем локализации радионуклида в системах водоочистки. Высокая миграционная способность делает тритий глобальным загрязнителем водных экосистем СИЯП и прилегающих к нему территорий, поскольку тритий в составе воды намного токсичнее трития в газовой фазе (ИТ) — до 400 раз.

Семипалатинский ядерный полигон являлся одним из двух основных ядерных полигонов СССР в 1949–1989 гг. За время своего существования он принес немало проблем живущим рядом с ним жителям, загрязнил значительные территории Казахстана и России, а также способствовал негативному отношению людей к продукции, которая поступала из загрязнённых районов. В ходе проведения испытаний ядерного оружия на территории СИЯП сформировались локальные участки тритиевого загрязнения, в основном это касается двух испытательных площадок — «Балапан» и «Дегелен», где было проведено более 300 ядерных испытаний в вертикальных скважинах и горизонтальных горных туннелях. Несмотря на то, что практически все испытания на исследуемой территории являлись подземными, вблизи расположения мест проведения ПЯВ зафиксированы численные значения трития в атмосферном воздухе, и это с учётом того, что с момента последнего взрыва прошло не одно десятилетие [Обеспечение радиационной..., 2009; Березин, 2015; Проведение комплекса..., 2016].

Тритий является одним из важных радионуклидов на территории СИЯП, он ведёт себя как вода в экосистемах и включается во все биологические рецепторы, такие как растения, животные, пищевые продукты [Murphy et al., 1999; Иваницкая, Малофеева, 2001]. Период полураспада трития — 12,26 года. Образуясь в атмо-, лито- и гидросфере, тритий участвует в круговороте воды в природе. Элементарный тритий (НТ), вступая во взаимодействие с почвой, растительностью и атмосферным воздухом, становится составной частью воды и органического вещества биологических объектов. В виде этих соединений он за счёт ингаляции и по пищевым цепочкам поступает в организм человека. Опасность трития в качестве источника внутреннего облучения определяется возможностью его присутствия в любых тканях в биологическом объекте, включая генетический материал клетки. Круговорот трития в природе в виде НТ и НТО изучен достаточно детально. Однако, учитывая специфичный характер загрязнения территории бывшего СИЯП, где содержание трития в объектах окружающей среды в сотни и тысячи раз превышает нормативные уровни, требуется особый подход к изучению его путей поступления и круговорота в окружающей среде [Murphy et al., 1999; Иваницкая, Малофеева, 2001].

Исследования радиоэкологической обстановки на СИЯП, проводимые в течение последнего времени, показали, что одним из основных радионуклидов, содержащимся в объектах окружающей среды, является ^3H . Были выявлены площади с чрезвычайно высоким уровнем его содержания на некоторых участках в поверхностных и подземных водах, растительности, снежном покрове [Лукашенко, 2010; Семипалатинский испытательный..., 2011], что могло привести к тритиевому загрязнению воздушной среды вследствие высокой миграционной способности ^3H между различными природными компонентами. Тритий может поступать в воздух в результате испарения с поверхности тритийсодержащей воды [Annual Report..., 1999; Tritium transfer..., 2005; A Method of Calibration..., 2008], а также из почвы и грунтовых вод [Suess, 1969; Study of soil..., 1990; Lin,

Wei, 2006; Contamination mechanisms..., 2012; Determination of the baseline..., 2022]. В зимний период поступление ^3H в атмосферу происходит с поверхности снежного покрова.

Исследование проводили на основных испытательных площадках СИП. Было выбрано пять участков исследования, характеризующихся проведением разных по виду ядерных испытаний: площадки «Дегелен» и «Балапан» — места проведения подземных ядерных испытаний в штольнях и скважинах; площадка «Опытное поле» — место проведения воздушных, наземных и приземных ядерных испытаний; территория реки Шагал — радиационно опасный объект полигона со значительным содержанием ^3H в воде; «Атомное» озеро — воронка, образовавшаяся в результате проведения экскавационного взрыва на площадке «Балапан» [Tritium in Streams, 2008; Contamination mechanisms..., 2012; Паницкий, Лукашенко, 2013; Субботин, Айдарханов, Дубасов, 2013].

Основным объектом исследования был выбран атмосферный воздух. Для изучения источников поступления ^3H в воздушную среду и механизмов формирования тритиевого загрязнения в качестве дополнительных объектов исследования были выбраны вода, растительность, почвенный воздух и почва [Исследование уровня..., 2013].

Для исследования объёмной активности ^3H в воздухе проводился отбор проб водяных паров атмосферного, штольневое воздуха и почвенной влаги методом криогенного вымораживания. Отбор проб водяных паров атмосферного воздуха проводился открытым способом: на выбранном участке устанавливалась криогенная установка и выполнялось вымораживание на высоте 50 см от земной поверхности.

Почвенная влага собиралась с использованием изолирующей ёмкости цилиндрической формы, позволяющей изолировать поступление атмосферного воздуха в отбираемую пробу. Для отбора проб штольневое воздуха криогенную установку с изолирующей ёмкостью устанавливали на поверхность насыпи портала так, чтобы она ориентировочно располагалась на уровне центральной оси котловой полости штольни. Далее процедура выполнялась таким же образом, как и для почвенной влаги, время отбора составляло порядка 1,5–2 часа.

Отбор проб растений для определения концентрации ^3H и биомассы растительного покрова на участках исследования проводился методом «укосов». При этом травянистые растения срезались на высоте 1–3 см, крупнотравье — 4–6 см. Продуктивность растительного покрова на каждом исследуемом участке определялась по трём площадкам, размер каждой из них в среднем 1 м². Удельная активность ^3H определялась в свободной воде растений — конденсата, полученного посредством специальной установки, представляющей собой герметичную ёмкость для загрузки проб растений, снабжённую охлаждаемой поверхностью и ёмкостью для сбора испаряемой растениями влаги [Исследование уровня..., 2013].

Отбор проб почвы проводился методом «конверта», то есть из углов и центра квадрата размером порядка 1 м². После предварительной подготовки пробы (просеивание, перемешивание, сушка) отбиралась навеска порядка 1 г — для процедуры автоклавного разложения, которое подразумевает полное разложение пробы с применением азотной и плавиковой кислот под давлением, с последующей нейтрализацией и дистилляцией.

Отбор проб поверхностных вод осуществлялся при помощи батометра, погружаемого в воду на заданную глубину. Пробы отбирались в пластиковые

ёмкости, которые герметично закрывались и транспортировались в лабораторию без предварительной консервации.

Определение активности ^3H в исследуемых пробах проводилось методом жидкосцинтилляционной спектрометрии. Непосредственно перед выполнением анализа все пробы проходили стадию фильтрации для удаления механических примесей, затем отбиралась аликвота объёмом 3 мл и помещалась в стандартную геометрию (пластиковая виала объёмом 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 ^3H в диапазоне 0–18 кэВ порядка 45–50 %) [Исследование уровня..., 2013].

Измерения выполнялись при помощи жидкосцинтилляционного спектрометра TriCarb 2900 TR с относительной эффективностью регистрации для выбранного диапазона измерений не менее 60 %. Область энергии для определения ^3H задана в интервале от 0 до 15 кэВ. Время измерения каждого образца составляло порядка 120 минут [Исследование уровня..., 2013].

Чувствительность используемых методов измерений составляет порядка 12 Бк/л — при определении удельной активности ^3H в свободной воде, 150 Бк/кг — при определении удельной активности ^3H в почве методом автоклавного разложения, 0,03–0,5 Бк/м³ — при определении ^3H в воздушной среде в зависимости от условий отбора проб и объёма отобранного образца [Contamination mechanisms..., 2012, Исследование уровня..., 2013].

В лаборатории применялась система обеспечения контроля качества результатов, её обязательной частью являлась проверка 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 ^3H в образце.

Глава 1. Площадка «Дегелен»

1.1. Описание объекта

Площадка «Дегелен» — одна из основных испытательных площадок СИП, где проводились подземные ядерные взрывы мощностью до 150 кт в горизонтальных горных выработках — штольнях. Всего за период с 1961 по 1989 гг в горном массиве была пройдена 181 штольня, где было испытано 295 ядерных устройств.

Горный массив Дегелен представляет собой вулканоплутоническую структуру радиусом около 10 км, центральная часть которой прорвана верхнепермским гранитным массивом. В горах Дегелен берут начало поверхностные водные системы, имеющие сток в различных направлениях. В периоды выпадения атмосферных осадков и весеннего снеготаяния часть воды транспортируется поверхностным водотоком за пределы горного массива, а часть просачивается по системам открытых трещин. Уровень подземных вод находится на глубине до 12 м. В результате ПЯВ в геологической среде формируется ряд зон необратимых деформаций, различающихся по степени разрушенности горных пород: полость, зоны смятия, дробления, наведённой трещиноватости, откола и столб обрушения (рис. 4.3).

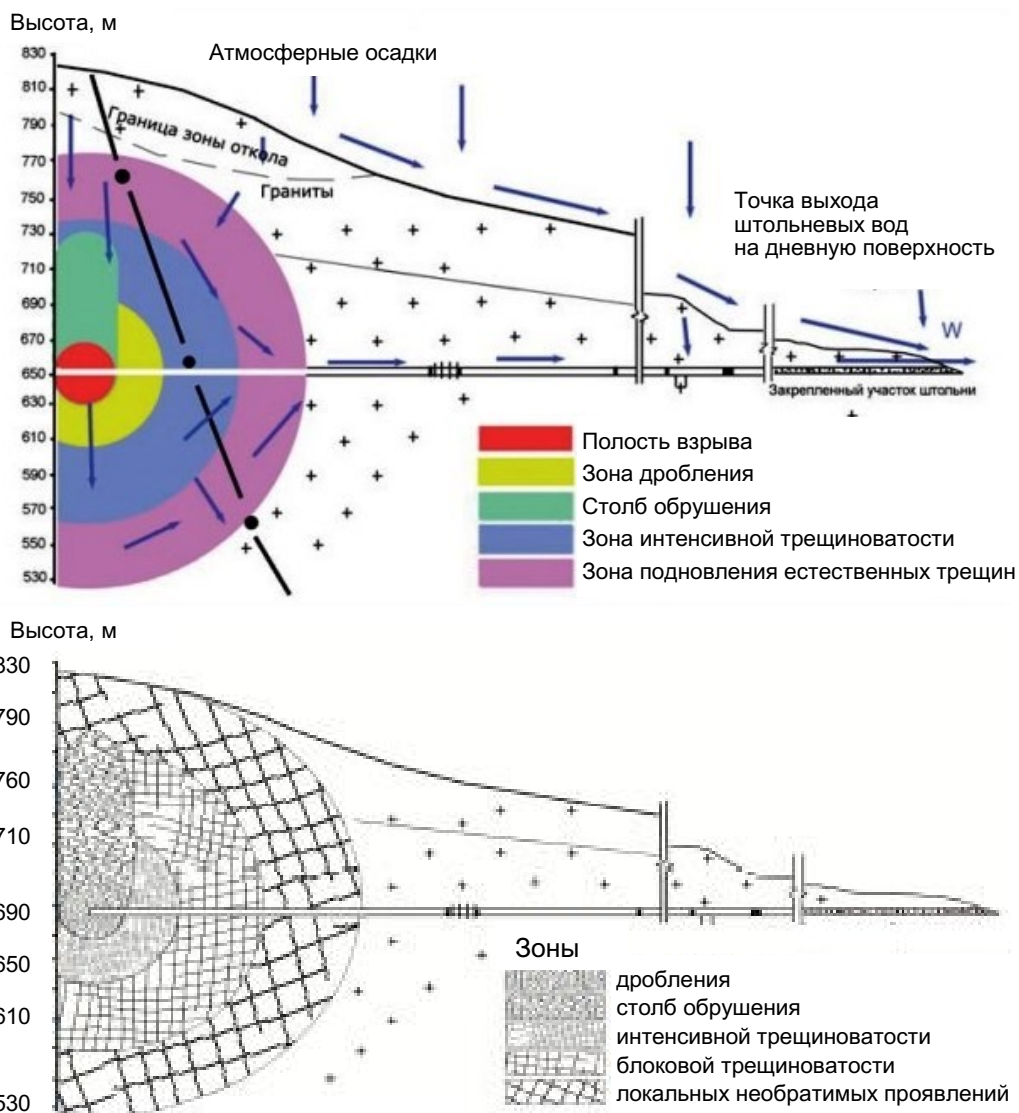
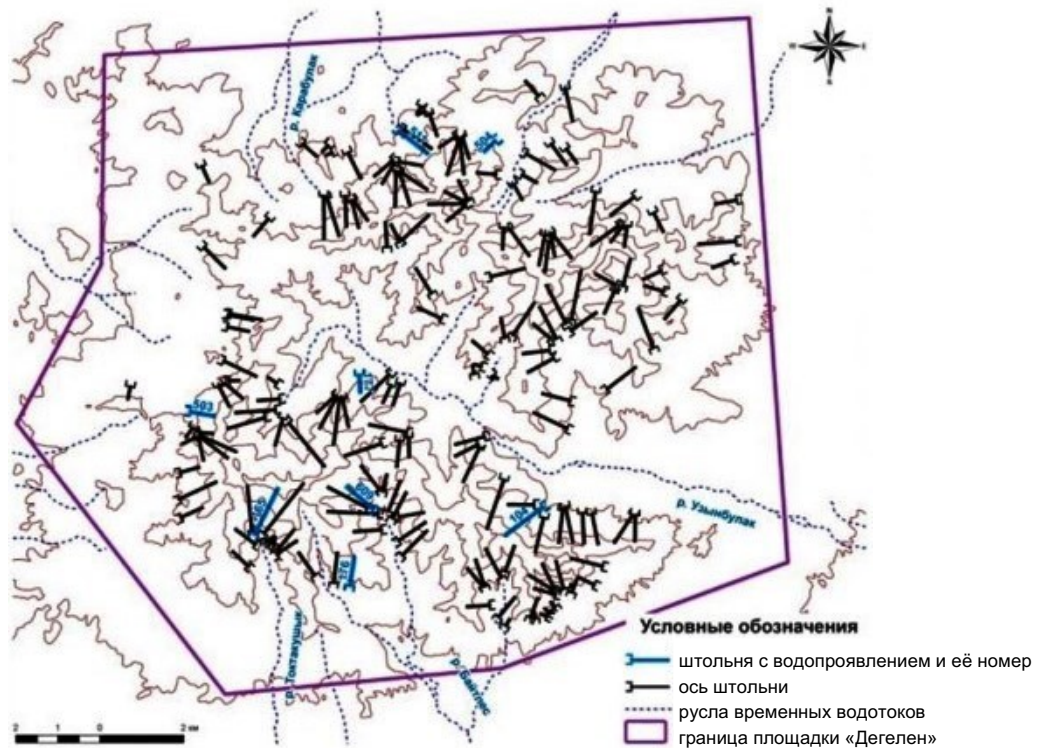


Рис. 4.3. Схема зон необратимых деформаций [Влияние радиоактивного..., 2016]

В зонах необратимых деформаций образуются две основные зоны локализации радионуклидов. Первая — радиоактивная стекло-шлакообразная порода, содержащая до 80 % всех продуктов деления и весь плутоний. Основная масса расплавленной породы остаётся в пределах полости взрыва. Второй источник — радиоактивная аэрозольно-пылевая компонента, локализованная на поверхностях дроблёной породы и плоскостях петрогенетических и техногенных трещин. Такое распределение обусловлено тем, что ^{90}Sr и ^{137}Cs являются дочерними продуктами радиоактивного распада газообразных предшественников криптона-90 и ксенона-137, которые при ПЯВ способны по трещинам распространяться на значительное расстояние [Влияние радиоактивного..., 2016].



а



б

Рис. 4.4. Горный массив Дегелен.
 Схема расположения локальных водосборных бассейнов (а) и штолен (б)

В результате поступления атмосферных осадков в зоны необратимых деформаций происходит переход радионуклидов в грунтовые штольневые воды. Загрязнённые радионуклидами воды, перемещаясь по системам трещин и полости штольни, пополняют бассейн подземных вод или выходят на дневную поверхность в районе порталов штолен. Весь фронт подземных вод, выходящих за пределы гор Дегелен, распределяется на отдельные потоки в соответствии с их принадлежностью к локальным водосборным бассейнам, где питание, транзит и разгрузка происходят в пределах бассейнов, имеющих протяжённость до 20 км (рис. 4.4, а). Поэтому миграция радионуклидов с подземными водами за пределы площадки «Дегелен» ограничена максимальным расстоянием 20 км [Влияние радиоактивного..., 2016].

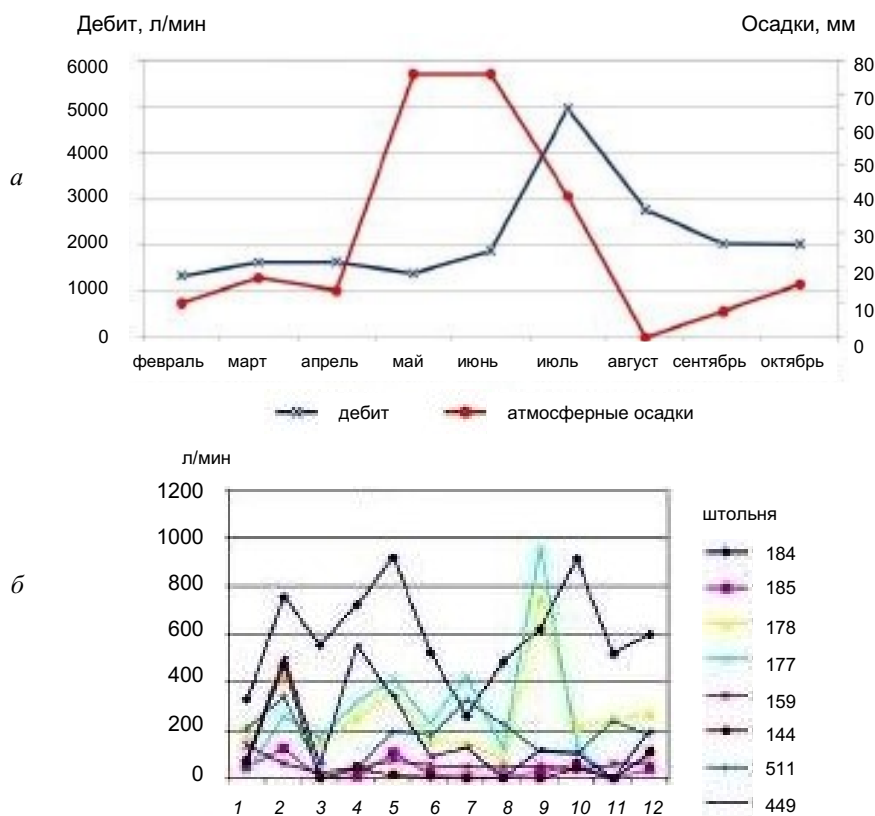


Рис. 4.5. Площадка «Дегелен»: а — пики дебита и атмосферных осадков; б — дебит водотоков из штолен (1–11 — 1996–2008 гг., 12 — 2010 г.) [Влияние радиоактивного..., 2016]

После закрытия всех водоносных штолен вода продолжала выходить на дневную поверхность в районе порталов 8 штолен (рис. 4.4, б). Установлено, что дебит штольневых потоков зависит от количества выпадающих атмосферных осадков. На рис. 4.5 можно чётко проследить расхождение во времени пиков максимального количества выпавших осадков и максимального суммарного дебита воды, поступающего из штолен. Пик дебита водотоков отстоит от пика

интенсивности атмосферных осадков почти на два месяца. Этот период можно принять за время инфильтрации атмосферных осадков через трещинную систему в горах Дегелен.

1.2. Исследование поведения радионуклидов, в том числе трития

Результаты многолетнего мониторинга штольневых вод показали, что удельная активность радионуклидов в каждом потоке длительное время остаётся относительно стабильной. Она варьирует в небольших пределах при различных количествах дебита потоков (рис. 4.6).

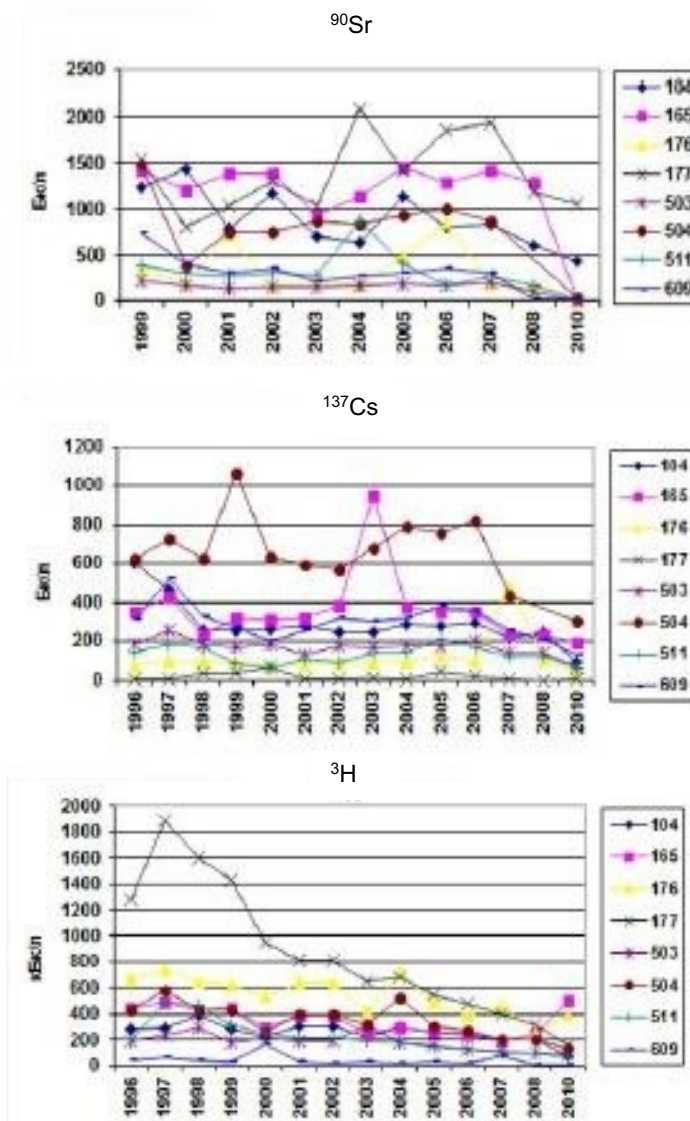
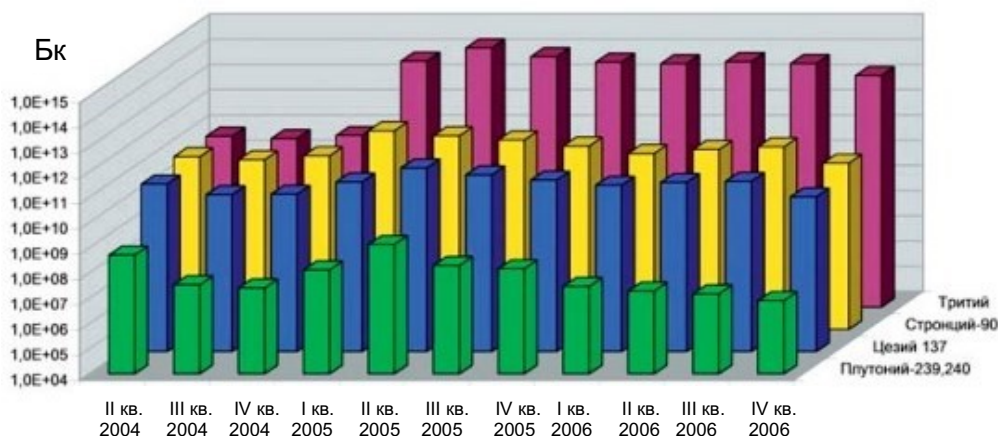


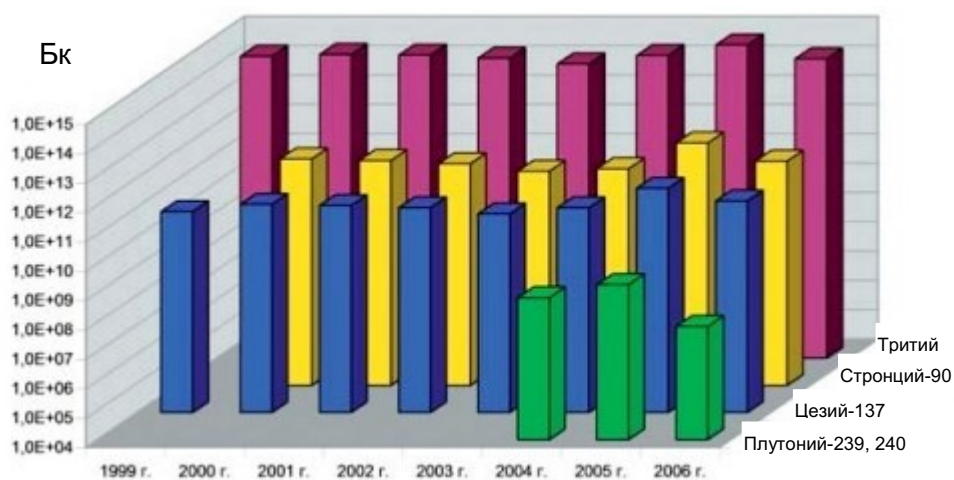
Рис. 4.6. Площадка «Дегелен». Мониторинг штольневых вод [Влияние радиоактивного..., 2016]

Наибольшая удельная активность ^3H сохраняется в течение всего периода наблюдений (начиная с 1996 г.) в штольне № 177, максимальная концентрация — 1900 кБк/кг отмечена в 1997 г. Аналогичная картина наблюдается и для ^{137}Cs , его наибольшая удельная активность — 1100 Бк/кг наблюдалась в штольне № 504 в 1999 г. Максимальная концентрация ^{90}Sr — 2100 Бк/кг была зафиксирована в воде из штольни № 177 в 2004 г. (см. рис. 4.6).

Более наглядно динамика выноса радионуклидов со штольневými водами представлена на данных квартального и годового выноса (рис. 4.7), здесь прослеживаются сезонные колебания, максимумы которых приходятся на вторые кварталы каждого года, а минимальные значения — на первые и четвертые.



a



б

Рис. 4.7. Результаты мониторинга штольневых вод:
a — квартальный; *б* — годовой [Субботин, 2016]

За границами горного массива Дегелен уровни концентрации техногенных радионуклидов (кроме ^3H) снижаются до уровней минимально детектируемой

концентрации. Концентрация ^3H в воде при выходе за пределы массива Дегелен достигает 300 кБк/кг, при удалении от гор на 10 км она снижается до 30 кБк/кг. При удалении от гор на 15–20 км концентрация трития на основных направлениях не превышает 1,0 кБк/кг, что в 7,7 раза ниже уровня вмешательства при поступлении с водой и пищей, установленного Гигиеническими нормативами к обеспечению радиационной безопасности [2022].

Ранее было установлено, что концентрация ^3H в растительности, подземных и поверхностных водах, в родниках и штольневых водотоках на территории площадки изменяется в пределах от десятков до сотен тысяч беккерелей на литр. Штольневые водотоки гидрологически связаны с основными ручьями, расположенными на площадке «Дегелен», что обуславливает вынос ^3H за пределы не только мест проведения испытаний, но и далеко за пределы испытательной площадки. Было установлено, что фоновая концентрация ^3H в атмосферном воздухе составляла не более 0,2 Бк/м³ [Ляхова, 2007]. На некотором этапе работы были проведены исследования распределения ^3H в воздушной среде в зонах расположения штолен, на прилегающих к ним территориях — в экосистемах штольневых ручьёв, и ручьёв, выходящих за пределы горного массива Дегелен.

При эпицентральных зонах ПЯВ содержание ^3H в воздухе определяли на участках 22 штолен, где были произведены взрывы различного характера. Измерения объёмной активности ^3H 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. 4.8 изображена штольня в горизонтальном разрезе и схема мест отбора проб.

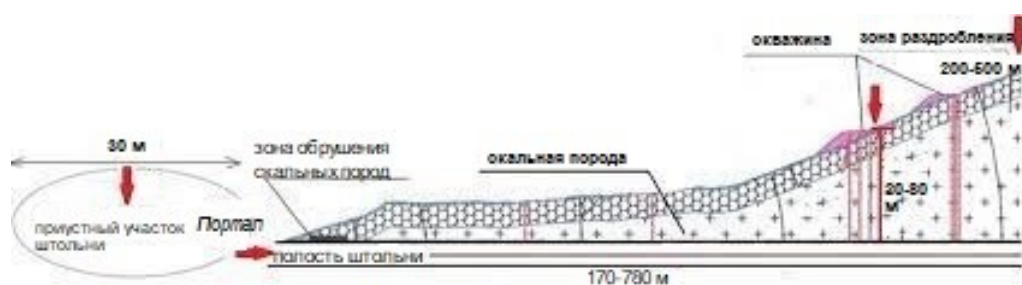
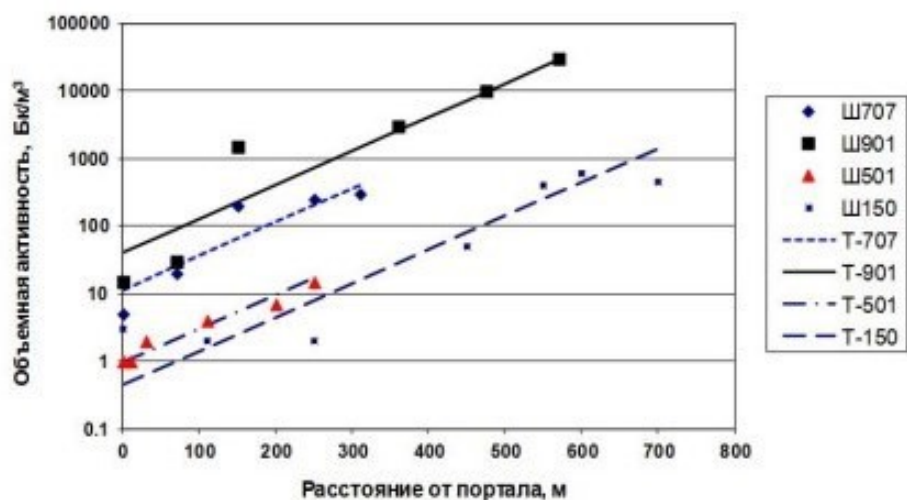


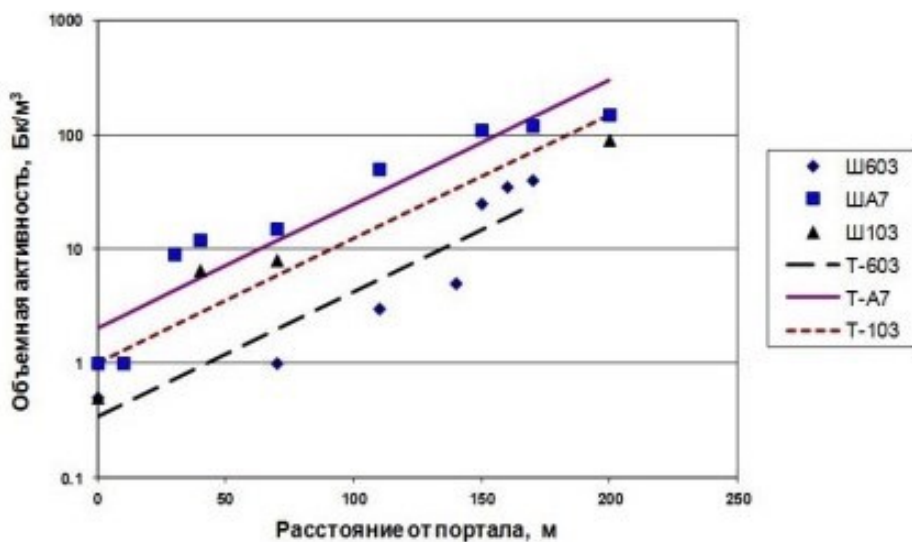
Рис. 4.8. Схематическое изображение штольни в горизонтальном разрезе [Исследование уровня..., 2013]

Исследование было проведено в семи штольнях, при этом установлено, что объёмная активность ^3H внутри полостей штолен изменяется в широком диапазоне значений — от 0,5 до 30 000 Бк/м³ [Исследование уровня..., 2013; Lyakhova, 2013], результаты исследований по каждой штольне представлены на рис. 4.9.

Максимальные концентрации ^3H наблюдаются вблизи концевых боксов. Экспоненциальное уменьшение объёмной активности по мере приближения к выходу из штольни объясняется возрастающим разбавлением за счёт поступления атмосферного воздуха и частичным выносом загрязнённого воздуха штольни через трещины разрушенной скальной породы.



a



б

Рис. 4.9. Распределение объёмной активности ^3H внутри полости штолен:
a — 707, 901, 501 и 150 (экспоненциальные функции $A_0 \cdot e^{0,0115x}$);
б — 603, А7, 103 (экспоненциальные функции $A_0 \cdot e^{0,025x}$) [Исследование уровня..., 2013]

Так как на портале штолен были зафиксированы детектируемые количества ^3H в воздухе, было сделано предположение, что ^3H может эманировать из полости штольни на открытую поверхность, даже если штольня «законсервирована». Для оценки эманации ^3H из полости были проведены исследования приустьевых участков семи «законсервированных» штолен. Пробы штольневых участков отбирались на портале штольни, пробы атмосферного воздуха — на удалении от него на расстоянии 50 м (табл. 4.1).

Объёмная активность ^3H на портале штольни изменяется в пределах от 0,5 до 16 Бк/м³, в атмосферном воздухе — от 0,3 до 2,5 Бк/м³ [Исследование уровня...,

2013; Lyakhova, 2013], то есть результатами исследования показана принципиальная возможность выхода ^3H с воздушными потоками из полостей штолен в воздушную среду исследуемого участка.

Таблица 4.1

Объёмная активность ^3H в штольневом и атмосферном воздухе
[Исследование уровня..., 2013]

№ п/п	Номер штольни	Объёмная активность ^3H , Бк/м ³	
		на портале штольни	на расстоянии 50 м от портала штольни
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	0,8
6	103	6,0	1,56
7	604	0,6	0,3

Исследования проводились на участках 16 штолен. На каждом приустьевом участке анализировалось, как минимум, по одной пробе атмосферного воздуха, отобранного на расстоянии 20 м от портала. Было установлено, что объёмная активность ^3H на приустьевых участках варьирует от 0,7 до 3,3 Бк/м³ [Исследование уровня..., 2013; Lyakhova, 2013]. Результаты представлены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Объёмная активность ^3H на приустьевых участках штолен

№ п/п	Номер штольни	Объёмная активность, Бк/м ³	№ п/п	Номер штольни	Объёмная активность, 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	A7	0,2	15	110	3,2
8	901	0,7	16	114	2,9

Исследования проводили также для подтверждения эманации трития из полости штолен в атмосферный воздух. Во всех случаях, исключая приустьевой участок штольни A7, содержание ^3H превысило фоновый уровень от 3,5 до 15 раз. Максимальное превышение фона — в 16,5 раза зафиксировано на приустьевом участке штольни № 150. Превышение фона более чем в 10 раз отмечено на приустьевых участках штолен № 136, № 111, № 110 и № 114 [Исследование уровня..., 2013; Lyakhova, 2013].

Исследовалось также содержание трития в местах расположения вертикальных геологических скважин, пробуренных в тело штольни. Для этого оценивалось поступление трития из тела штольни над её поверхностью сквозь трещиноватости в горной породе, а также по скважинам, пробуренным в штольни сверху. Исследовалось семь штолен. Результаты измерений объёмной активности ^3H в атмосферном воздухе представлены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Объёмная активность ^3H в местах расположения геологических скважин
[Исследование уровня..., 2013]

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

Результаты измерений показали, что над всеми штольнями произошло увеличение концентрации ^3H в атмосфере от 4 до 20 раз сразу после бурения скважин [Исследование уровня..., 2013; Lyakhova, 2013]. Превышение уровня концентрации ^3H в воздухе над фоновыми значениями до бурения скважин говорит о том, что ^3H поступает в атмосферу путём миграции по зонам разуплотнения скальных пород, расположенных над штольней.

Изучалось содержание трития в зоне максимального раздробления горных пород над полостью ПЯВ. Исследования проведены с целью оценки возможности поступления ^3H 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. Исследовалось 15 штолен. Объёмная активность ^3H в них изменялась в пределах от 0,1 до 4 Бк/м³ [Исследование уровня..., 2013; Lyakhova, 2013]. Полученные значения объёмной активности ^3H в атмосферном воздухе в ряде случаев превысили фоновый уровень от 1,5 до 15 раз (рис. 4.10).

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

При оценке распределения ^3H в воздушной среде в районе расположения штолен в водопроявлениях и с учётом высоких уровней концентрации ^3H в воде на исследуемой территории было сделано следующее предположение. Штольневый водоток является источником поступления ^3H в воздушную среду. Детально исследовались экосистемы водотоков штолен № 176 и № 177,

расположенных в притоках ручьёв Байтлес и Узынбулак соответственно. Особенностью выбранных участков является наличие штолен с водопроявлением в виде открытых водотоков, выходящих на поверхность у порталов штолен. Протяжённость русла составляет 400–600 м, с постепенным пересыханием водотока по мере удаления от портала, среднегодовая удельная активность трития в воде 300 кБк/л на штольне № 176 и 550 кБк/л на штольне № 177 [Ляхова и др., 2013; Распределение трития..., 2020; Assessment of the tritium..., 2021].

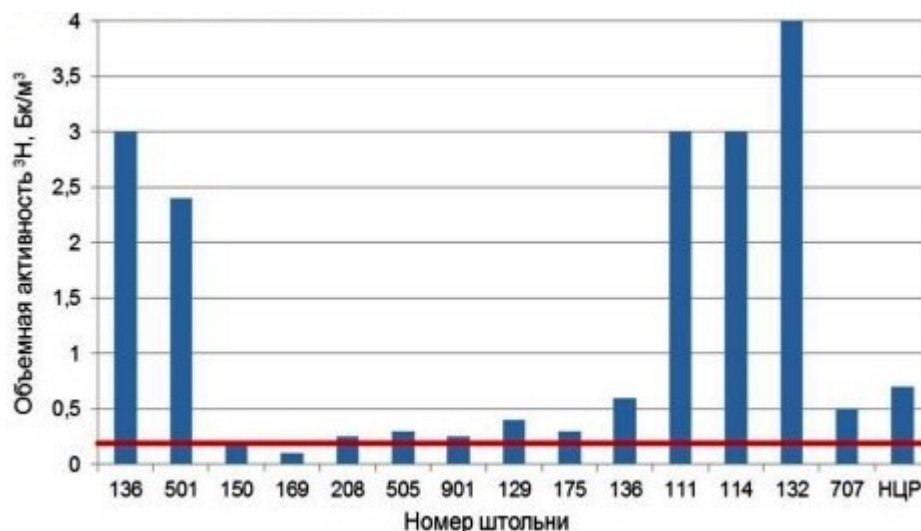


Рис. 4.10. Содержание трития в атмосфере в зоне максимального раздробления над полостью ПЯВ [Исследование уровня..., 2013]

Для изучения распределения трития в воздушной среде отбор проб атмосферного воздуха проводили в продольном и поперечном направлении относительно русла. В продольном направлении исследования проводили по трём линиям, расположенным параллельно руслу [Исследование уровня..., 2013].

Линия 1 располагалась на расстоянии не более 50 см от кромки воды, линия 2 — с левой стороны русла, линия 3 — с правой стороны 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 уровня..., 2013].

Исследование распределения трития в атмосферном воздухе в продольном и поперечном направлении относительно русла штольневых водотоков.

На основании анализа 54 проб атмосферного воздуха (рис. 4.11) определена максимальная объёмная активность ³H в русле водотоков, которая составляла 2 00 и 1350 Бк/м³ для штолен № 176 и № 177 соответственно [Ляхова и др., 2010б; Исследование уровня..., 2013].

Изменение с расстоянием объёмной активности ³H в воздухе по линии 1 у штольни № 176 хорошо описывает экспоненциальная функция $y = 1400 \exp(-0,0097x)$,

($R^2 = 0,95$). По обоим водотокам отмечена общая тенденция на уменьшение концентрации ^3H в атмосфере с увеличением расстояния от портала штольни: по мере протяжённости ручья, объёмная активность ^3H в воздухе значительно снижается и на расстоянии 400 м составляет уже 40–60 Бк/м³ [Ляхова и др., 2010б; Исследование уровня..., 2013].

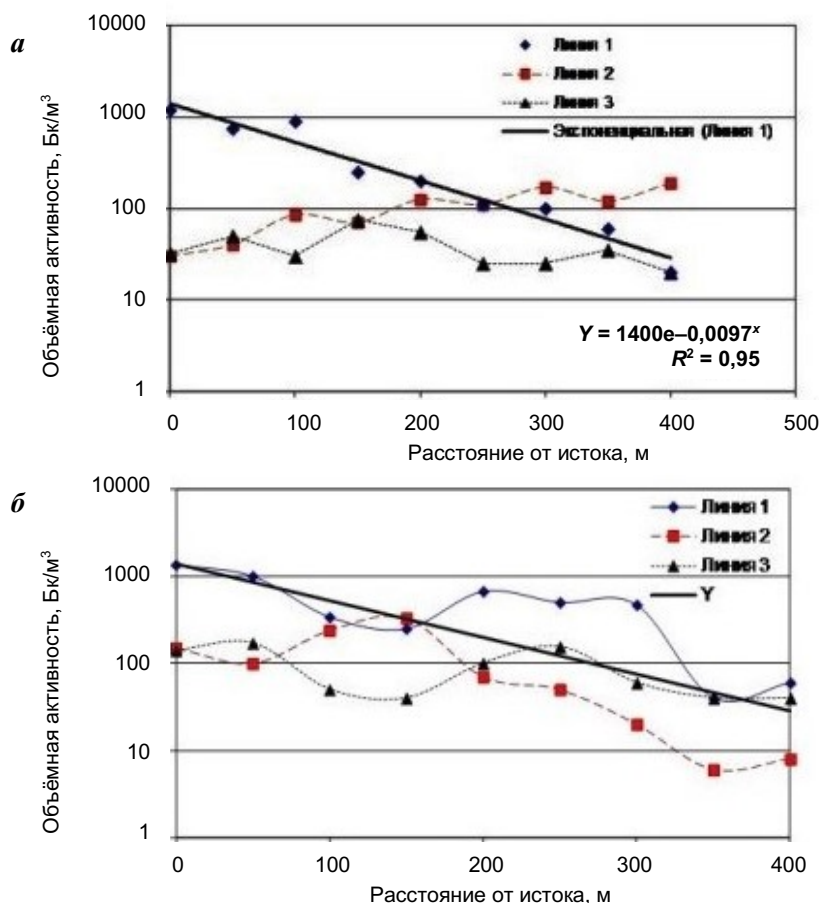


Рис. 4.11. Распределение объёмной активности ^3H в воздухе по линиям вдоль водотока: *а* — из штольни № 176; *б* — из штольни № 177 (γ -тренд для линии 1 у штольни № 176) [Ляхова и др., 2010б; Исследование уровня..., 2013]

Для исследования в поперечном направлении относительно русла было отобрано и проанализировано 40 проб водяных паров в четырех профилях на водотоке штольни № 177 (рис. 4.12).

Объёмная активность ^3H в воздухе с увеличением расстояния от ручья значительно уменьшается — от 500–1300 Бк/м³ вблизи русла до 20–30 Бк/м³ на расстоянии 70–100 м в сторону. 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 [Ляхова и др., 2010б; Исследование уровня..., 2013].

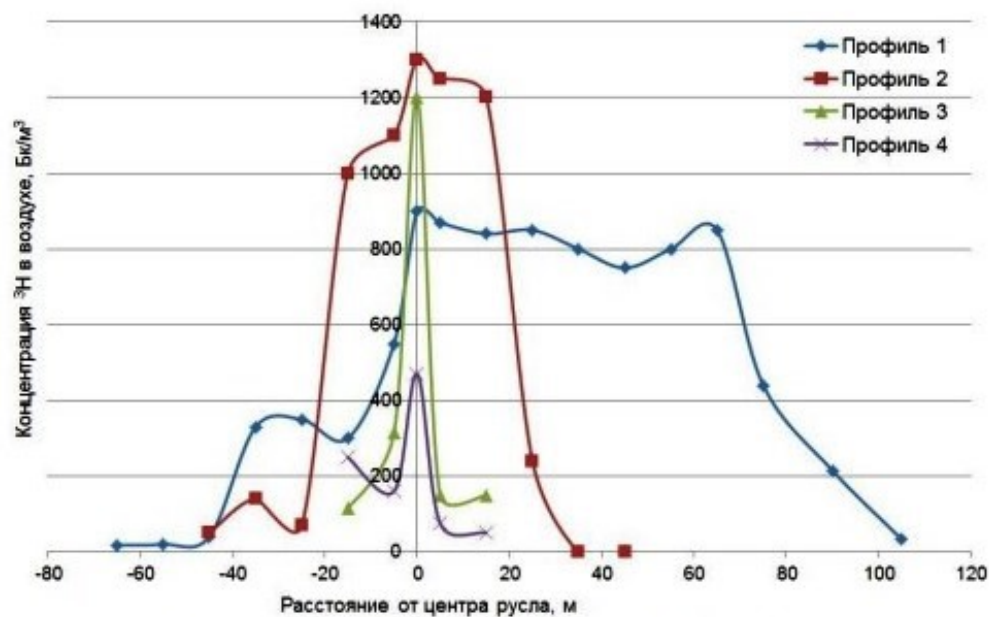


Рис. 4.12. Распределение объёмной активности ^3H в воздухе по мере удаления от водотока [Ляхова и др., 2010б; Исследование уровня..., 2013]

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

Исследования распределения трития в системе вода — атмосферный воздух проводили с целью оценки тритиевого загрязнения воздушной среды и изучения распределения ^3H вблизи поверхностного водотока. Вдоль русла водотока штольни № 177 производился сопряженный отбор проб водяных паров воздуха и воды (табл. 4.4).

Удельная активность ^3H в воде, согласно полученным результатам, изменяется от 145 до 380 Бк/л, объёмная активность составляла от 50 до 255 Бк/м³ [Ляхова и др., 2010б; Исследование уровня..., 2013].

Таким образом, было установлено следующее. Отношение объёмной активности ^3H в атмосферном воздухе к объёмной активности ^3H в воде составило $(4,6 \pm 1,3) \cdot 10^{-4}$ л/м³ (относительная ошибка 28 %). На величину концентрации ^3H в атмосфере оказывает влияние интенсивность испарения водяных паров с поверхности ручья, которая, в свою очередь, будет зависеть от разницы температуры воды и воздуха, относительной влажности воздуха и скорости ветра. Тогда объёмная активность ^3H в воздухе вблизи открытого источника может изменяться в разы при одинаковой удельной активности ^3H в воде. Исследования по распределению трития в системе почвенный воздух — растения — атмосферный воздух проводили с целью установления связей между содержанием ^3H в растениях, почве и атмосферном воздухе на различных расстояниях от русла ручья из штольни № 177.

Таблица 4.4
Концентрация ^3H в воде и атмосферном воздухе (экспериментальные данные)

№ п/п	Концентрация ^3H , Бк/м ³		Воздух/вода, (10 ⁴), л/м ³
	в воде	в воздухе	
1	375000	200	5,3
2	370000	170	4,6
3	380000	255	6,7
4	370000	100	2,7
5	350000	170	4,9
6	330000	125	3,8
7	265000	100	3,8
8	170000	50	2,9
9	145000	125	8,6
10	200000	115	5,8
11	140000	80	5,7

Для этого одновременно по четырём поперечным профилям отбирались пробы влаги в почве, растениях и атмосферном воздухе. На каждом участке, кроме того, определяли биомассу растительного покрова.

Чтобы установить распределение ^3H в системе почвенный воздух — растения — атмосферный воздух, на различном расстоянии от русла ручья из штольни № 177 по четырём поперечным профилям производили одновременно отбор проб влаги в почве и атмосферном воздухе, а также проб растительности.

Проведённый анализ показал, что установление отдельных связей между удельной активностью ^3H в атмосферном или почвенном воздухе, в то же время между нормированной на единичную площадь (1 м²) активностью ^3H в растительности $A_{\text{раст}}$ (Бк/м²), определяемой перемножением биомассы $M_{\text{раст}}$ (кг/м²) на удельную активность растений $C_{\text{раст}}$ (Бк/кг), и объёмной активностью ^3H в атмосферном воздухе $C_{\text{атм}}$ (Бк/м³) выявлена пропорциональная зависимость с коэффициентом корреляции R^2 , равным 0,81 (рис. 4.13) [Ляхова и др., 2010б; Исследование уровня..., 2013].

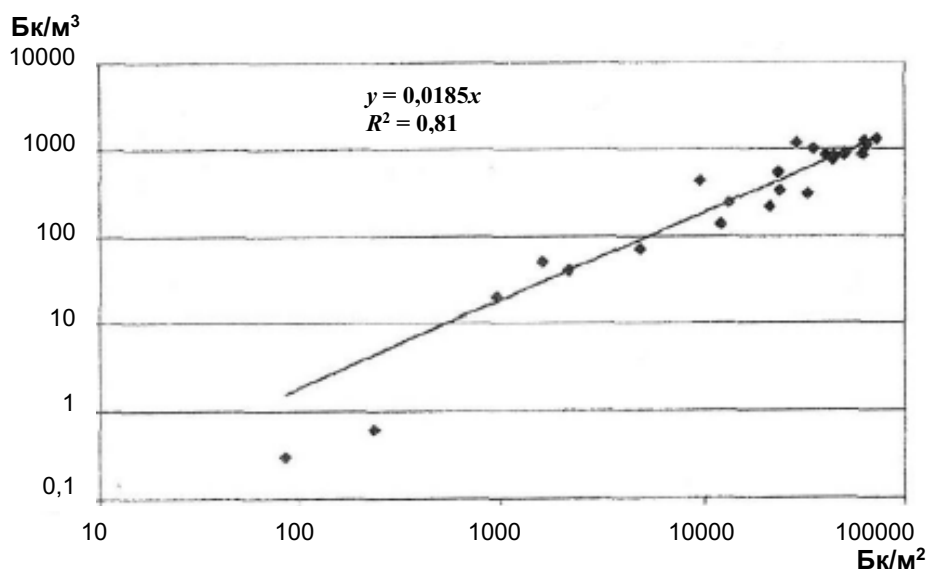


Рис. 4.13. Зависимость объёмной активности ^3H (ось ординат) от активности растительного слоя (ось абсцисс) [Ляхова и др., 2010б; Исследование уровня..., 2013]

Отсутствие корреляции между содержанием ^3H в почвенном воздухе и удельной, или общей, активностью ^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 учёта всех источников поступления ^3H в атмосферу.

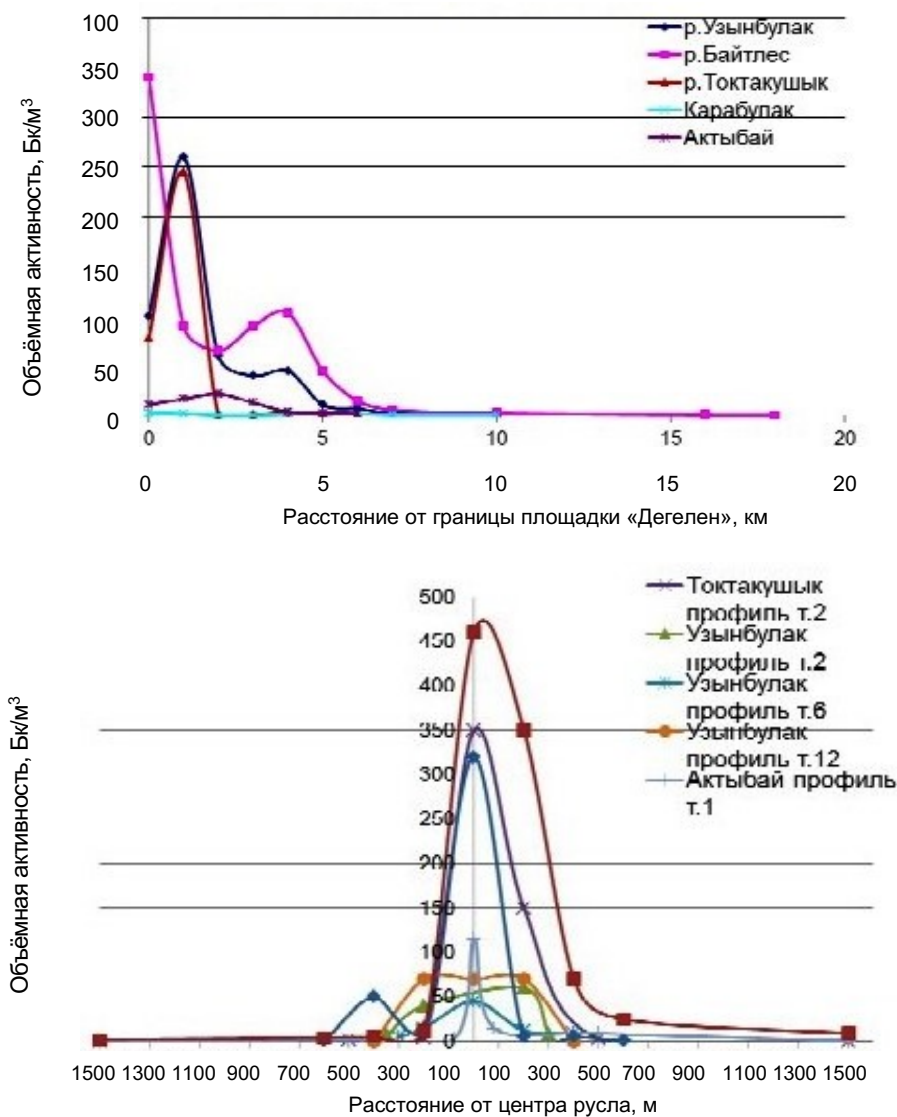


Рис. 4.14. Характер распределения трития в воздушной среде за пределами площадки «Дегелен» [Исследование уровня..., 2013; Lyakhova, 2013]

При изучении уровня и характера распределения трития в атмосферном воздухе за пределами площадки «Дегелен» осуществлялось выявление возможных зон выноса ^3H за пределы площадки с поверхностными водотоками, а также изучался характер распределения ^3H в воздушной среде в продольном

(рис. 4.14, *a*) и в поперечном направлении (рис. 4.14, *б*) относительно русла основных ручьёв за пределами испытательной площадки.

По итогам исследования установлено следующее: основное загрязнение ^3H воздушной среды за пределами площадки «Дегелен» территориально приурочено к руслам основных ручьёв; зона максимального содержания трития в воздухе расположена в пределах 5 км от границы площадки «Дегелен», далее его содержание уменьшается и на расстоянии 10 км от границы составляет единицы беккерелей на кубический метр. Объёмная активность ^3H в поперечном направлении относительно русла логично снижается с увеличением расстояния от центра русла. Максимальное значение концентрации ^3H в воздухе наблюдается вблизи русла на расстоянии более 500 м [Исследование уровня..., 2013; Lyakhova, 2013].

Глава 2. Испытательная площадка «Балапан»

2.1. Описание объекта

На испытательной площадке «Балапан», расположенной в восточной части СИП, в период с 1965 по 1989 гг. было проведено 106 ПЯВ мощностью до 165 кт в вертикальных скважинах. Площадка «Балапан» представляет собой котловину диаметром около 20 км, обрамленную мелкосопочником. На значительной части территории подземные воды имеют напорный характер с величиной напора до 73 м (рис. 4.15).

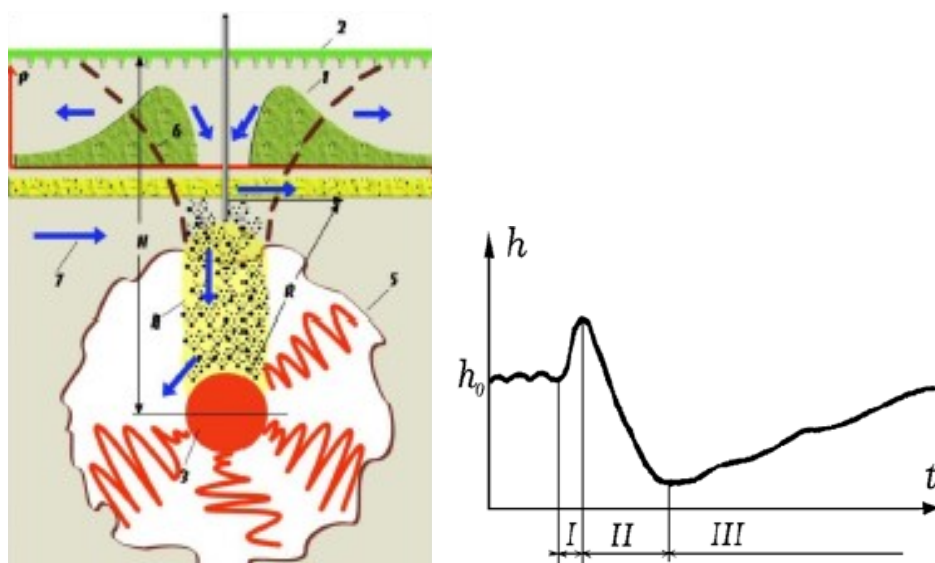


Рис. 4.15. Гидродинамические эффекты в блоках горных пород при проведении подземных ядерных взрывов:

- 1 — распределение давления подземных вод при формировании столба обрушения;
- 2 — дневная поверхность; 3 — камуфлетная полость; 4 — столб обрушения;
- 5 — зона наведённой трещиноватости; 6 — область приповерхностного разуплотнения;
- 7 — направление движения подземных вод [Субботин, 2016]

Движение подземных вод осуществляется при достаточно малых величинах гидравлического уклона и низких скоростях фильтрации. На большей части площадки расходы потоков подземных вод близки к своим средним и достаточно низким значениям — менее 1 м³/сут. Максимальные величины расходов — до 2 м³/сут — наблюдаются в южной части площадки, где локализуется область питания подземных вод. Региональный фильтрационный поток направлен от области питания к области разгрузки, представленной долиной реки Иртыш.

Образовавшиеся полости после взрывов в скважинах, в отличие от ПЯВ в горизонтальных штольнях, расположены значительно ниже уровня подземных вод. Повышенные температуры в полости могут долго сохраняться в связи с наличием толщи перекрывающих пород. Высокие температуры способствуют образованию тепловой конвекции. Вода, достигнув полости, разогревается, растворяет химические элементы и радионуклиды и может медленно возвращаться вместе с ними в верхние горизонты [Субботин, 2016].

Основные особенности гидродинамических процессов, вызываемых подземным взрывом, прослеживаются при следующей схематизации явления (рис. 4.15). Соответствующие взрыву волновые процессы вызывают деформацию окружающей среды, причем состояние пласта-коллектора изменяется в большей степени, в отличие от вмещающих относительно монолитных пород. Динамическое сжатие коллектора приводит к повышению давления жидкости в некоторой области, что способствует подъему уровня подземных вод. Этот процесс сопровождается инъекцией воды в порово-трещинное пространство массива горных пород в трещины, ранее существовавшие и вновь образованные в результате взрыва. Момент завершения формирования камуфлетной полости определяет продолжительность возмущения водонасыщенного пласта-коллектора. Последующее образование столба обрушения вызывает центральную депрессию в образовавшемся куполе подземных вод [Субботин, 2016].

Для оценки характера радиоактивного загрязнения подземных вод на площадке «Балапан» проводили опробование более 100 ранее пробуренных гидрогеологических скважин. На ряде участков выполнены дополнительные исследования, включающие буровые, геофизические и опытно-фильтрационные работы (рис. 4.16). Распространение техногенных радионуклидов в подземных водах имеет следующие особенности:

¹³⁷Cs. Во всех исследуемых пробах воды содержание ¹³⁷Cs не превысило допустимых значений для питьевой воды. Самая большая его концентрация (4 Бк/кг) была обнаружена в гидрогеологической скважине, расположенной в 50 м от «боевой» скважины 1056.

⁹⁰Sr. На большей части площадки содержание ⁹⁰Sr в подземных водах не превышает 1,0 Бк/кг. Наибольшее значение — 1240 Бк/кг было зафиксировано в скважине, расположенной в 50 м от «боевой» скважины 1056. При удалении от «боевых» скважин на первые сотни метров содержание этого радионуклида снижается до уровней порядка миллибеккереля на килограмм.

Таким образом, ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr не распространились на расстояния более 50 м от боевых скважин.

²³⁹⁺²⁴⁰Pu. Содержание этих изотопов в подземных водах на исследованных участках не превышает минимальной детектируемой удельной активности, равной 0,002 Бк/кг.

³H. В подземных водах его концентрация варьирует в широком диапазоне — от минимально детектируемой до 4800 кБк/кг.

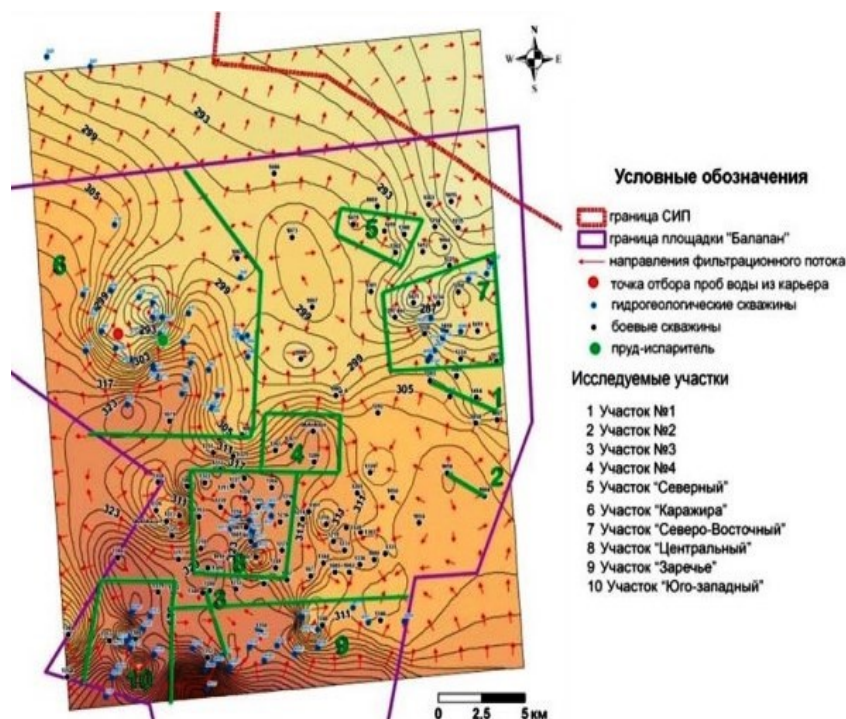


Рис. 4.16. Схема расположения участков исследований [Субботин, 2016]

2.2. Исследование поведения трития

Загрязнение данной местности незначительно, так как при проведении подземных взрывов в скважинах радиоактивные продукты остались «захороненными» в геологической толще пород. Поверхностных вод в местах расположения скважин нет. Удельная активность НТО в грунтовых водах изменяется в широком диапазоне значений — от 0,01 до 4000 кБк/л, глубина залегания в пределах площадки составляет 1–5 м [Исследование уровня..., 2013]. В растениях удельная активность ^3H изменяется в пределах от 20 до 70 Бк/кг, объёмная активность ^3H в почвенном воздухе может достигать 300 Бк/м³, в атмосферном — до 70 Бк/м³, содержание ^3H в почве составляет до 104 Бк/кг (табл. 4.5) [Исследование уровня..., 2013].

Здесь в летние месяцы (июль и август 2014 г.) присутствие $^3\text{H}_{\text{газ}}$ отмечалось на приустьевых участках всех скважин, за исключением скважины 1058. При этом частота встречаемости присутствия $^3\text{H}_{\text{газ}}$ в почвенном воздухе выше, чем в атмосферном. Численные значения удельной активности ^3H в почве были зафиксированы также на всех участках исследования, за исключением скважины 1058 [Исследование уровня..., 2013].

Для исследований приустьевых участков боевых скважин проводился сопряжённый отбор проводящих паров атмосферного и почвенного воздуха для определения содержания ^3H (рис. 4.17). При обобщении полученных данных выбрано шесть скважин для детализации площадного исследования приустьевых участков (рис. 4.18).

Таблица 4.5

Удельная активность $^3\text{H}_{\text{газ}}$ в атмосфере, почвенном воздухе и почве
вблизи устья боевых скважин на площадке «Балапан»

Номер скважины	Объёмная активность, Бк/м ³				Удельная активность ^3H в почве, Бк/кг
	$^3\text{H}_{\text{газ}}$		НТО		
	атмосфера	почва	атмосфера	почва	
1071	< 0,5	0,8 ± 0,5	3,0 ± 1,0	5 ± 1	500 ± 50
1267	0,9±0,5	1,2 ± 0,5	3,5 ± 1,0	220 ± 20	12000 ± 1200
1058	< 0,5	< 0,5	5,0 ± 0,5	3,5 ± 0,7	< 50
1010	190 ± 15	40 ± 6	15 ± 1	45 ± 2	12500 ± 1200
1355	3,0 ± 0,5	3,5 ± 0,5	< 0,5	< 0,5	700 ± 70
1309	< 0,5	3,0 ± 0,5	< 0,5	< 0,8	200 ± 50

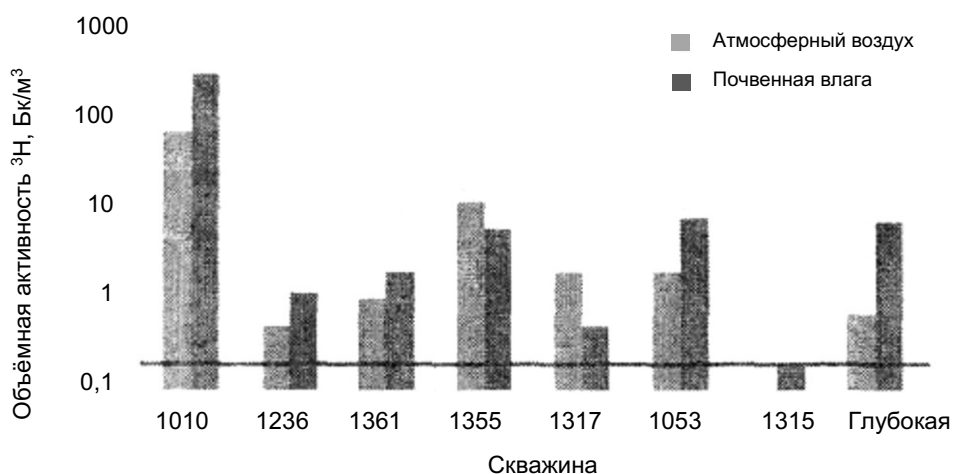


Рис. 4.17. Содержание трития в водяных парах атмосферного воздуха и почвенной влаги [Исследование уровня..., 2013]

Объёмная активность ^3H в почвенной влаге для разных скважин изменяется в пределах от < 0,2 до 300 Бк/м³, в атмосферном воздухе — от < 0,05 до 70 Бк/м³ [Исследование уровня..., 2013]. Значительная концентрация ^3H в почвенной влаге показывает возможность выхода трития на поверхность из полостей ПЯВ. Пространственное распределение ^3H в воздушной среде исследовалось над скважинами. Вид распределений на примере трёх скважин — «Глубокая», 1355 и 1361 показан на рис. 4.18.

Установлено, что в отдельных случаях на графиках имеется несколько пиков, что говорит о возможности выхода трития на земную поверхность в нескольких местах, на расстоянии до 200 м от центра скважины. Величина выхода ^3H и его местоположение различны для разных приустьевых участков. Это может быть связано с количеством проведённых взрывов и глубиной залегания их полостей, с нарушениями ландшафта поверхности, а также

с наличием внутренних полостей, дополнительных зон трещиноватости и развитой зоны грунтовых вод, значительно загрязнённых ^3H и залегающих на небольшой глубине.

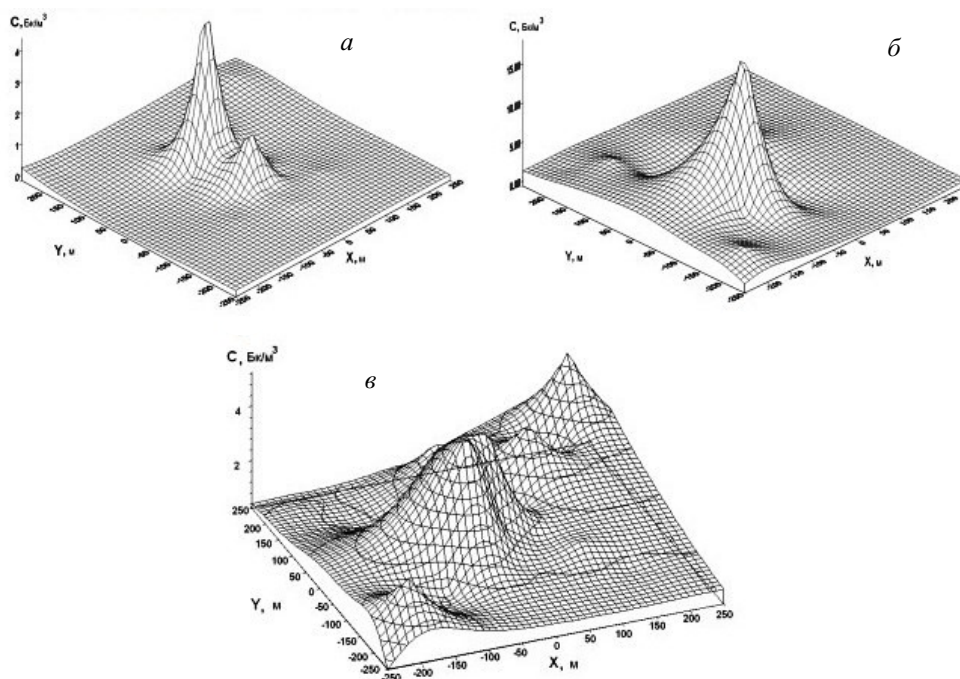


Рис. 4.18. Пространственное распределение трития в почвенном воздухе над скважинами «Глубокая» (а), 1355 (б) и 1361 (в) [Исследование уровня..., 2013]

2.3. Содержание трития в снежном покрове

Объектами исследования были выбраны 20 приустьевых участков боевых скважин на площадке «Балапан» с уровнем подземных вод на глубине 5–13 м от поверхности почвы (табл. 4.6) и скважина 1003 на площадке «Сарыузень». На рис. 4.19 дано месторасположение исследовательских скважин на площадке «Балапан». Основные характеристики боевых скважин приведены в табл. 4.6.

Выбор объектов исследования на площадке «Балапан» проводили с учетом анализа архивных данных (относительно мощности взрыва, глубины залегания заряда и минимального уровня грунтовых вод) [Субботин, 2010, Исследование содержания трития в снежном..., 2018].

14 октября 1965 г. на скважине 1003 (площадка «Сарыузень») проводилось экскавационное ядерное испытание (с выбросом грунта) малой мощности 1,1 кт на сравнительно малой глубине 48 м. Над эпицентром ПЯВ образовалась воронка диаметром более 150 м, высота навала достигает 10 м. На приустьевом участке скважины наблюдаются повышенные концентрации техногенных радионуклидов (^{137}Cs , ^{241}Am , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{90}Sr) в почве.

При обследовании приустьевых участков боевых скважин площадки «Балапан» были применены различные методологические подходы.

Таблица 4.6

Основные характеристики проведённых ядерных испытаний
на выбранных боевых скважинах площадки «Балапан» [Субботин, 2010]

Номер скважины	Дата взрыва	Глубина заложения заряда, м	Мощность взрыва, кт	Глубина скважины, м	Уровень подземных вод, м	Примечание
1007	10.02.1972	295	16	454,0	9,5	Наблюдается провал в 15 от устья
1010	11.06.1978	556	60	614,0	13,2	Выявлено наличие газов
1054	30.11.1969	472	160	397,2	11,5	Измерения не проводились
1058	27.12.1974	535	51	398,6	12,0	Наблюдается небольшой провал вблизи устья
1061	02.11.1972	521	165	652,0	11,1	Измерения не проводились
1062	04.07.1976	535	90	651,0	9,0	То же
1080	29.06.1977	340	9	503,6	5,2	«
1087	12.10.1980	436	102	–	–	«
1202	28.08.1976	535	58	455,0	12,5	«
1206	29.10.1975	535	90	–	8,5	«
1220	14.09.1980	483	190	427,0	10,8	«
1222	29.11.1978	535	100	550,0	9,3	«
1227	29.06.1980	535	93	550,0	5,8	«
1309	02.12.1979	535	93	550,0	10,8	«
1313	16.12.1984	543	137	600,0	10,85	«
1315	12.03.1987	529	58	600,0	–	«
1350	14.09.1988	642	108	600,0	9,0	«
1355	13.12.1987	530	130	600,0	–	Наблюдается воронка диаметром 20 м и глубиной 12 м
1400	29.05.1977	393	44	607,0	7,14	Измерения не проводились
1414	26.05.1984	489	150	549,0	12,1	Наблюдается воронка диаметром 10 м и глубиной 3 м

Общую оценку содержания трития в снежном покрове проводили на скважинах 1007, 1010, 1054, 1061, 1062, 1080, 1202, 1206, 1222, 1227, 1309, 1315, 1350, 1355 и 1400. Отбор проб снега осуществляли в пяти точках (центр, север, юг, запад, восток) на расстоянии 50 м от оголовка. На скважинах 1058, 1087, 1414 отбор проб снега проводили в 25 точках по координатной сети 0,25×0,25 км с шагом 50 м. Центр координатной сети располагался у оголовка боевой скважины. Пробы снега отбирали на всю глубину снежного покрова 0–20 см.

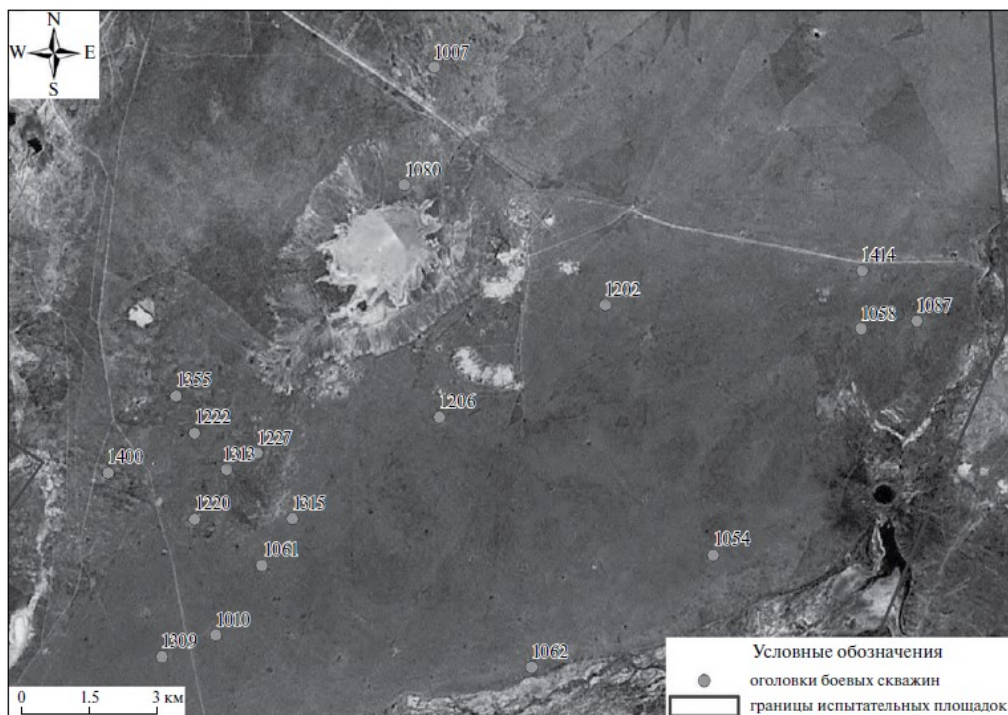


Рис. 4.19. Расположение исследовательских боевых скважин на площадке «Балапан» [Исследование содержания трития в снежном..., 2018]

Чтобы оценить фоновые концентрации трития в снежном покрове, на приустьевом участке боевых скважин 1220 и 1313 заложено по два исследовательских «луча», которые были направлены в северном и южном направлениях от оголовка скважины, их общая длина составляла 300 и 500 м соответственно, с шагом между точками обследования 20 м. Отбор проб снега также выполняли на всю глубину снежного покрова.

На скважинах 1355 и 1010 проводили площадное исследование содержания трития в снежном покрове. В 2011 и 2012 гг. на скважине 1355 отбор проб снежного покрова осуществляли по координатной сетке 1×1 км, расстояние между точками обследования составляло 100 м. Центр координатной сети располагался у оголовка боевой скважины [Исследование содержания трития в снежном..., 2018].

Для получения более детальной информации о содержании трития в снежном покрове в 2013 г. на скважинах 1355, 1010 площадки «Балапан» и 1003 площадки «Сарыузенъ» пробы снежного покрова отбирали по координатной сети

0,5 Ч 0,5 км с шагом 50 м. Отбор проб снежного покрова проводили послойно на глубину 0–10 (поверхностный слой) и 10–20 см (приземный слой). В случаях, когда общий слой снега был менее 20 см, отбор проб снега проводили на глубину 0–10 см и на оставшуюся глубину до подстилающей поверхности. Для измерения толщины снежного покрова была использована мерная линейка.

Данные о содержании трития в снежном покрове на приустьевых участках 18 боевых скважин площадки «Балапан» представлены в табл. 4.7 [Исследование содержания трития в снежном..., 2018]. На всех приустьевых участках боевых скважин обнаружено наличие трития в снежном покрове. Максимальные концентрации трития в снеге отмечены вблизи и на оголовках боевых скважин 1007, 1010, 1058, 1087, 1222, 1355, в ряде случаев достигающие 40–70 Бк/кг.

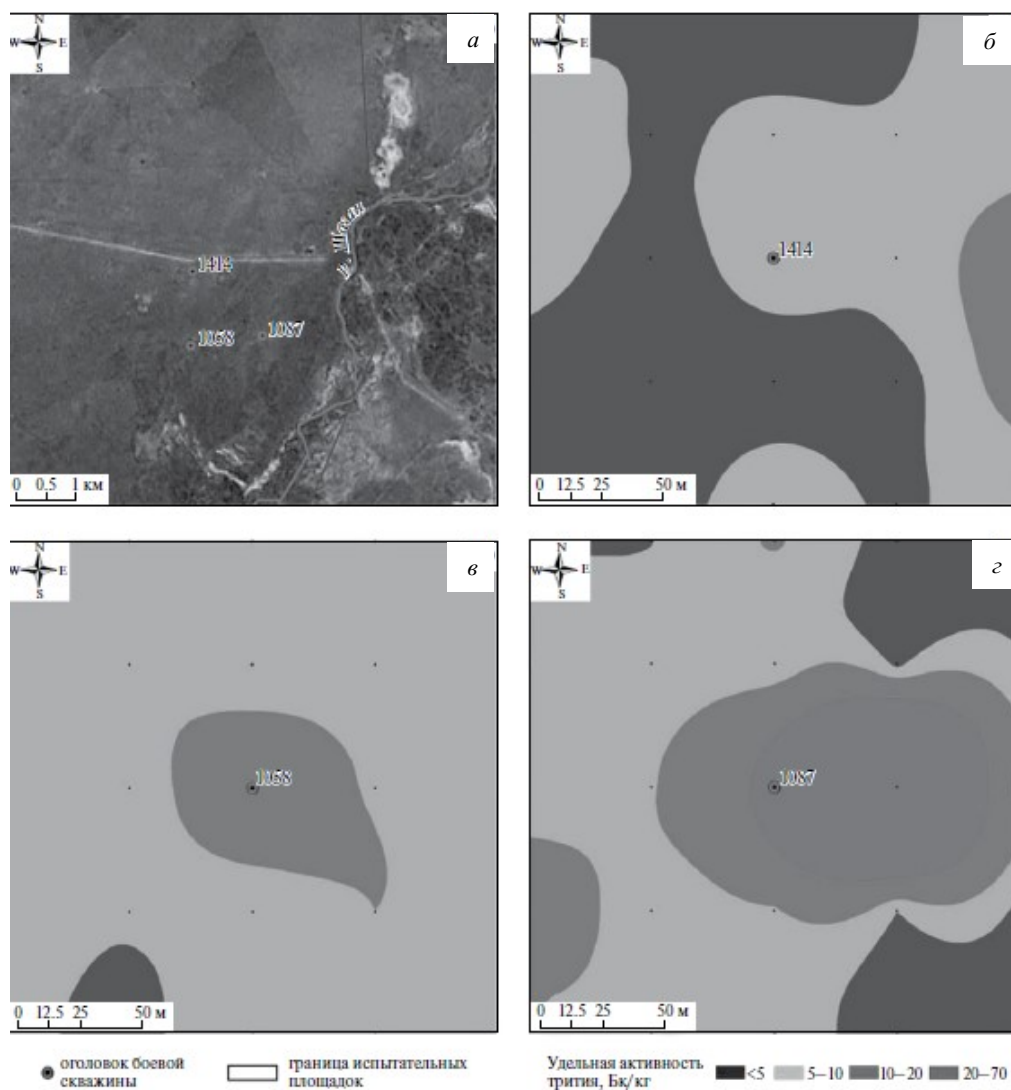


Рис. 4.20. Содержание трития в снежном покрове на боевых скважинах площадки «Балапан»: *а* — расположение боевых скважин; *б* — скважина 1058; *в* — скважина 1087; *г* — скважина 1414 [Исследование содержания трития в снежном..., 2018]

На рис. 4.20 представлено содержание трития в снежном покрове на боевых скважинах 1058, 1087 и 1414 площадки «Балапан».

Таблица 4.7

Содержание трития в снежном покрове
на приустьевых участках боевых скважин площадки «Балапан»

Номер скважины	Удельная активность трития, Бк/кг					
	Оголовок	Север	Юг	Запад	Восток	Среднее
1007	20,0 ± 3,0	8,2 ± 1,7	7,3 ± 1,5	6,8 ± 1,4	5,8 ± 1,2	9,6
1010	65,0 ± 7,0	14,0 ± 2,0	13,0 ± 2,0	12,0 ± 2,0	12,0 ± 2,0	23,2
1054	< 3	–	8,2 ± 1,7	3,7 ± 0,8	5,5 ± 1,1	5,0
1058	19,0 ± 4,0	5,3 ± 1,1	5,3 ± 1,2	6,4 ± 1,4	9,1 ± 1,9	9,0
1061	9,0 ± 1,8	8,9 ± 1,8	7,9 ± 1,6	3,5 ± 0,7	5,4 ± 1,2	7,0
1062	–	–	–	8,6 ± 1,7	4,4 ± 0,9	–
1080	9,6 ± 1,9	4,5 ± 1,0	–	–	8,8 ± 1,8	7,6
1087	25,0 ± 4,0	5,9 ± 1,3	9,5 ± 1,9	9,8 ± 2,0	71,0 ± 10,0	24,2
1202	9,9 ± 1,9	7,3 ± 1,5	5,1 ± 1,1	3,1 ± 0,07	4,9 ± 1,0	6,0
1206	–	4,8 ± 1,0	3,7 ± 0,8	3,4 ± 0,7	4,9 ± 1,0	4,2
1220	8,1 ± 1,7	5,1 ± 1,1	4,9 ± 1,1	12,0 ± 2,0	8,3 ± 1,7	7,7
1222	7,2 ± 1,5	38,0 ± 6,0	12,0 ± 2,0	5,9 ± 1,2	3,8 ± 0,8	13,4
1227	6,8 ± 1,4	11,0 ± 2,0	6,0 ± 1,3	7,2 ± 1,5	6,6 ± 1,4	7,5
1309	13,0 ± 3,0	< 3	< 3	6,3 ± 1,3	3,8 ± 0,8	5,6
1315	9,2 ± 1,9	7,4 ± 1,5	–	5,0 ± 1,1	7,6 ± 1,6	7,3
1355	47,0 ± 5,0	20,0 ± 3,0	36,0 ± 4,0	13,0 ± 2,0	12,0 ± 2,0	25,6
1400	4,2 ± 0,9	4,9 ± 1,1	8,0 ± 1,8	6,9 ± 1,4	8,7 ± 1,8	6,5
1414	7,7 ± 1,6	6,0 ± 1,3	3,2 ± 0,7	3,1 ± 0,7	6,0 ± 1,3	5,2

Примечание. «-» — данные отсутствуют.

На приустьевом участке скважины 1414 содержание трития в снежном покрове не превышает 10 Бк/кг. На скважине 1058 повышенные концентрации трития в снеге, достигающие 20 Бк/кг, обнаружены только вблизи её оголовка. Максимальные концентрации трития в снежном покрове, составляющие 40 и 70 Бк/кг соответственно, выявлены на скважине 1087, вблизи ее оголовка и на расстоянии 50 м в восточном направлении [Исследование содержания трития в снежном..., 2018].

Полученные данные позволили предположить, что наличие повышенных концентраций трития в снежном покрове (более 10 Бк/кг) связано с эманацией трития из подстилающей поверхности почвы. Концентрация трития в снежном покрове менее 10 Бк/кг является локальным уровнем фона для площадки «Балапан». Для подтверждения данного предположения на приустьевых участках боевых скважин 1220 и 1313 проведены исследования по оценке фоновых концентраций трития в снежном покрове.

Содержание трития в снежном покрове по профилям, ориентированным в северном и южном направлении от оголовков скважин 1220, 1313, представлено

на рис. 4.21. На скважине 1220 повышенные концентрации трития в снежном покрове, составляющие 11–17 Бк/кг, обнаружены вблизи ее оголовка скважины (на отметках 20–100 м); на скважине 1313 повышенные концентрации трития в снежном покрове, не превышающие 14 Бк/кг, расположены на расстоянии 300–400 м.

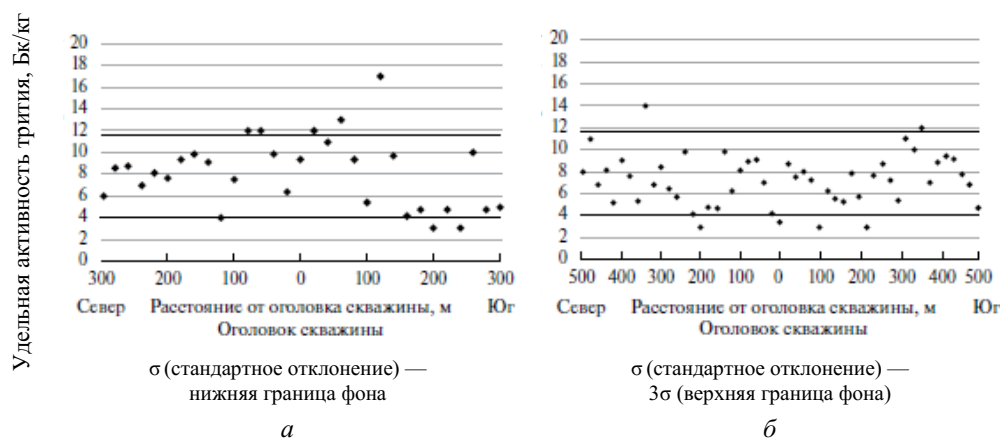


Рис. 4.21. Содержание трития в местах проведения ядерных испытаний:
а — скважина 1220; *б* — скважина 1313 [Исследование содержания трития в снежном..., 2018]

На рис. 4.22 приведены данные (обобщённые за период 2011–2013 гг.) о содержании трития в поверхностном и приземном слое снежного покрова на боевых скважинах 1355 и 1010 площадки «Балапан». Представленные результаты включают все накопленные данные, полученные в зимний период с 2011 по 2013 гг., а массив данных по скважине 1355 за 2011–2013 гг. нанесён на карту, при этом в совпадающих точках координатной сети для каждого слоя рассчитано среднее значение. Для удобства представления, обработки и нанесения данных на карту предел обнаружения трития в снежном покрове был принят за целочисленное значение (например, $< 11 = 11$).

Результаты проведённых исследований выявили участки с повышенным содержанием трития в снежном покрове. Как правило, максимальные концентрации трития в снеге наблюдаются на оголовке скважин 1355 и 1010, в ряде случаев они достигают 400 Бк/кг. Стоит также отметить, что максимальные концентрации трития в снеге обнаружены не только на оголовке скважины, но и на расстоянии 200–300 м в южном направлении от эпицентра ядерного испытания (рис. 4.22, *б*). Сравнение данных поверхностного и приземного слоя снежного покрова показало, что в приземном слое снега концентрация трития больше, чем в поверхностном. Данный факт подтверждает ранее сделанное предположение о поступлении (эманации) трития из работы [Исследование содержания трития ..., 2018].

Содержание трития в поверхностном и приземном слое снежного покрова на боевой скважине 1003 площадки «Сарыузенъ» в марте 2014 г. находилось на уровне предела обнаружения — менее 13 Бк/кг (рис. 4.23), на самой скважине тритий не обнаружен.

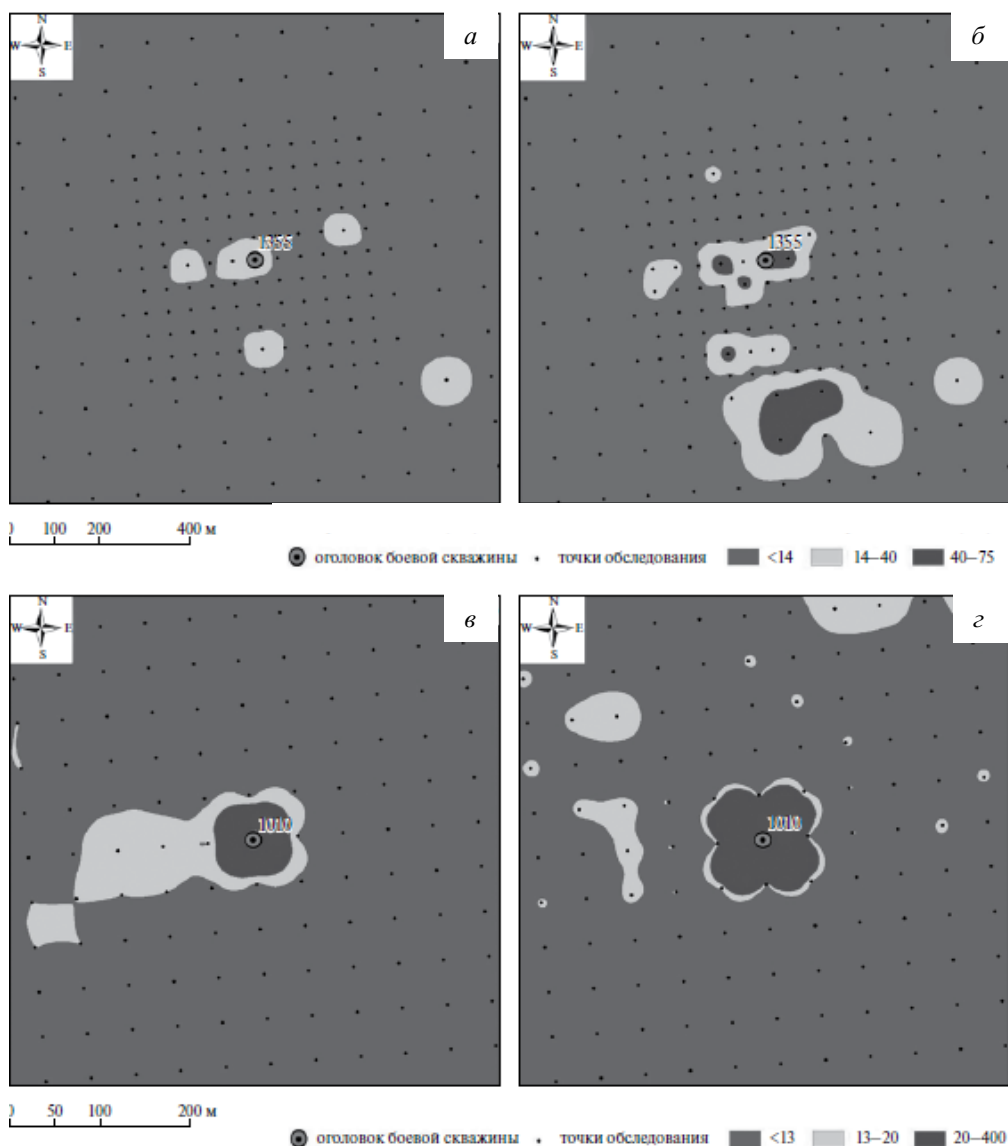


Рис. 4.22. Содержание трития в снежном покрове на боевых скважинах:
a — скважина 1355, поверхностный слой снега; *б* — скважина 1355, приземный
 слой снега; *в* — скважина 1010, поверхностный слой снега; *г* — скважина 1010,
 приземный слой снега [Исследование содержания трития..., 2018]

По результатам общей оценки содержания трития в снежном покрове выявлены приустьевые участки боевых скважин на площадке «Балапан», имеющие повышенные концентрации трития в снеге. На выбранных участках проведено площадное исследование содержания трития в снежном покрове. На всех исследовательских участках концентрация трития находилась в диапазоне от менее 3 до 71 Бк/кг. Для того чтобы определить локальный уровень фоновых концентраций трития в снежном покрове на площадке «Балапан», проводили анализ всех имеющихся данных. Для наглядности представления результатов весь массив полученных данных концентрации трития в снежном покрове

разделён на интервалы (< 3, 3–4, 4–5, 5–6, 6–7, 7–8, 8–9, 9–10 и > 10 Бк/кг). Для каждого интервала посчитано количество случаев (встречаемость) и построена диаграмма распределения.

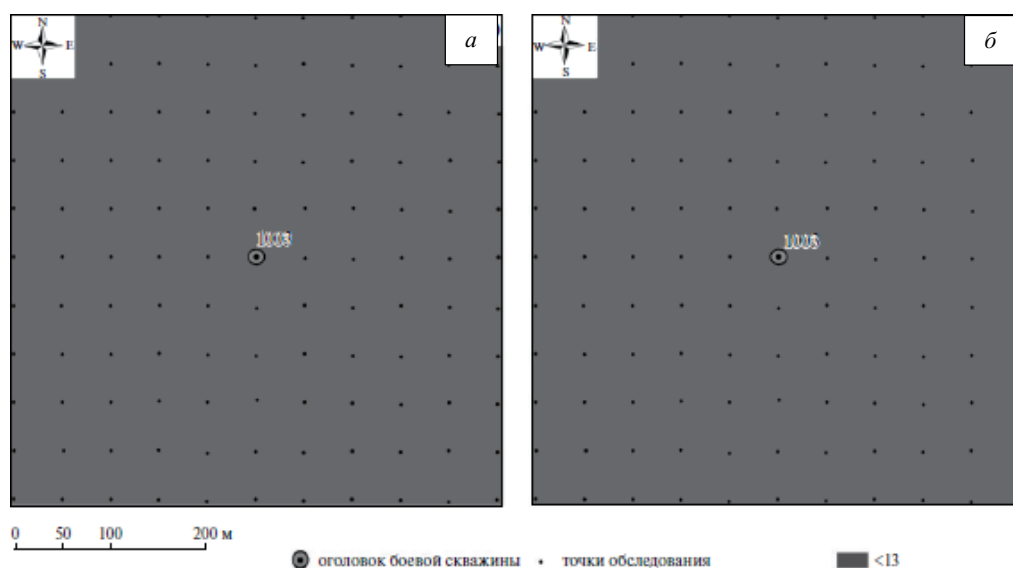


Рис. 4.23. Содержание трития (Бк/кг) в снежном покрове на боевой скважине 1003: *а* — поверхностный слой снега; *б* — приземный слой снега [Исследование содержания трития в снежном..., 2018]

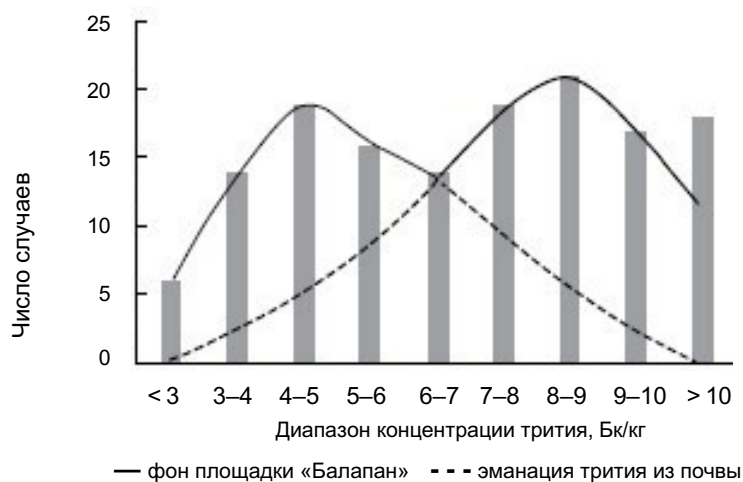


Рис. 4.24. Распределение фоновых концентраций трития в снежном покрове [Исследование содержания трития в снежном..., 2018]

На рис. 4.24 представлен график распределения фоновых концентраций трития в снежном покрове, который показывает, что максимальное количество случаев наблюдается в интервалах 4–5 и 8–9 Бк/кг, форма кривой аппроксимации напоминает сложный «двугорбый» характер, предположительно состоящий из двух гауссовых кривых. Можно предположить, что первая кривая Гаусса

с максимумом в интервале 4–5 Бк/кг (рис. 4.24) отражает данные о локальном фоне площадки «Балапан», а вторая кривая с максимумом в интервале 8–9 Бк/кг и более описывает эманацию трития из почвенного покрова. Расчётное значение стандартного отклонения (σ) всего массива данных составляет 3,9 Бк/кг (условная нижняя граница фона), 3σ (верхняя граница фона) — 11,7 Бк/кг.

Используя полученные расчетные значения верхней и нижней границы фона, в местах проведения ядерных испытаний на боевых скважинах 1220 и 1313 можем выявить участки с повышенным содержанием трития в снежном покрове и, как следствие, зоны явной эманации трития из почвы.

На скважине 1220 (см. рис. 4.21, а) максимальные концентрации трития наблюдаются вблизи ее эпицентра, а это означает, что вблизи оголовка скважины наблюдается явный процесс эманации трития из почвенного покрова в снежный покров. На скважине 1313 повышенные концентрации трития в снежном покрове обнаружены на расстоянии 300–400 м от ее оголовка. Весьма вероятно, что в местах с повышенным содержанием трития в снежном покрове располагаются геологические разломы, образовавшиеся при проведении подземных ядерных испытаний, через которые тритий поступает в снежный покров.

Таким образом [Турченко и др., 2018], детальные площадные исследования снежного покрова на скважине 1355 выявили участки с повышенными концентрациями трития в приземном слое снега. Максимальные концентрации трития в снежном покрове, не превышающие 75 Бк/кг, обнаружены вблизи и на расстоянии 200 м в южном направлении от оголовка скважины. На скважине 1010 максимальная концентрация трития, достигающая 400 Бк/кг, выявлена также в приземном слое снега, вблизи ее оголовка. Стоит также отметить, что концентрация трития в приземном слое снега больше, чем в поверхностном слое, что также подтверждает ранее предложенное мнение об эманации трития из почвенного покрова. На площадке «Сарыузен» на скважине 1003 тритий не обнаружен; возможно, образовавшийся при ядерном испытании тритий испарился в атмосферу.

Тем не менее остаётся открытым вопрос о «природе» происхождения трития в снежном покрове: он поступает в верхний слой почвенного покрова из котловой полости ПЯВ или из близко расположенного подземного водоносного горизонта? Для более детального исследования механизмов поступления трития в снежный покров на приустьевых участках боевых скважин необходимо провести дополнительные работы по изучению геологического строения и химического состава грунта по глубине. Кроме того, на площадке «Балапан» нужно провести дополнительные исследования снежного покрова, которые позволят оценить фон глобальных выпадений трития из атмосферы для данной местности, то есть распространение трития на СИП гораздо масштабнее, чем предполагалось нами ранее.

Глава 3. Площадка «Опытное» поле

3.1. Описание объекта

Для исследования выбраны испытательная площадка «Опытное» поле, где проводились наземные воздушные ядерные испытания, и «Атомное» озеро — место проведения экскавационного взрыва. На площадке «Опытное» поле

участками исследования были эпицентры взрывов, на территории «Атомного» озера — воронка взрыва и внешнее водохранилище, образовавшееся в результате проведения испытаний. «Атомное» озеро образовано в 1965 г. путём подрыва термоядерного боезаряда в 140 кт в русле реки Шаган на испытательной площадке «Балапан» (Семипалатинский ядерный полигон) (рис. 4.25).

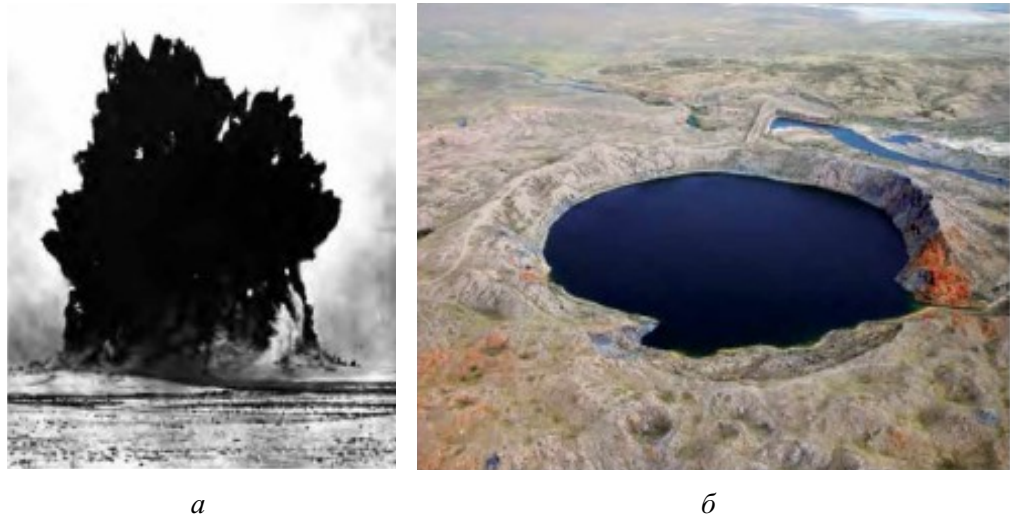


Рис. 4.25. Экскавационный взрыв: в скважине 1004 «Атомное» озеро (а), «Атомное» озеро (б) (Семипалатинский..., 2017)

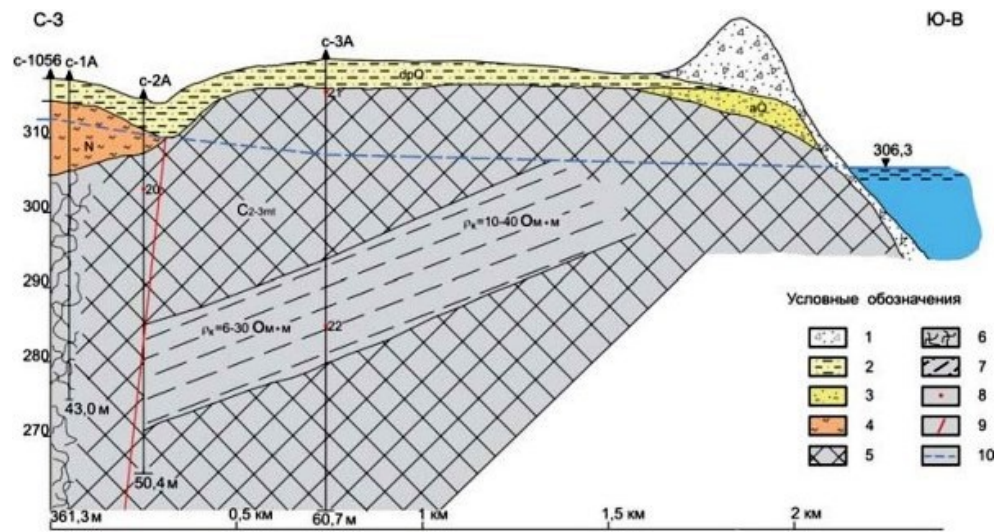


Рис. 4.26. Разрез по профилю: скважина 1056 — скважина 1004 («Атомное» озеро): 1 — навал породы, выброшенной взрывом; 2 — делювиально-пролювиальные супеси и пески (dpQ); 3 — аллювиальные пески и галечники (aQ); 4 — водоупорные глины неогена (N); 5 — терригенные грубообломочные отложения майтубинской свиты среднего-верхнего карбона (C2-3mt); 6 — зона обрушения при взрыве в скважине 1056; 7 — горизонт пород, имеющий пониженное удельное электрическое сопротивление; 8 — повышенная γ -активность по данным каротажа (мкР/час); 9 — тектоническое нарушение; 10 — уровень подземных вод [Влияние радиоактивного..., 2016]

Диаметр озера составляет 500 м, глубина от поверхности воды до дна — 80 м. Целью являлось создание ряда водохранилищ в засушливых районах, в которых могла бы аккумулироваться, в частности, паводковая вода. Проект выглядел весьма многообещающе, если принять во внимание тот момент, что дно подобных водоёмов в результате взрывов оплавлялось и, таким образом, должно было представлять собой идеальное хранилище для воды. К сожалению, по сей день и вода «Атомного» озера, и его территория является заражённой и непригодной, так как все радиоактивные вещества залегли на дно озера.

Чтобы оценить характер распределения радионуклидов в подземных водах при удалении от центральных зон ПЯВ, проведены проверочные полевые исследования, для чего между «боевыми» скважинами 1056 и 1004 («Атомное» озеро) пробурен створ скважин (рис. 4.26).

Значения абсолютных отметок уровня подземных и поверхностных вод дают основания утверждать, что разгрузка подземных вод происходит от скважины 1056 по направлению к «Атомному» озеру. В табл. 4.8 приведены содержания радионуклидов в подземных водах площадки «Балапан».

Таблица 4.8

Содержание радионуклидов в подземных водах
площадки «Балапан» [Субботин, 2016]

№ п/п	Место и дата отбора пробы	³ H, кБк/кг	⁹⁰ Sr, Бк/кг	¹³⁷ Cs, Бк/кг	Ближайшая «боевая» скважина, км
1	С-1А июнь 2005 г.	282	1240,0	4,0	1056/0,06
2	С-2А, гл. 20 м июнь 2005 г.	1537	49	< 0,1	1056/0,2
3	С-2А, гл. 35 м июнь 2005 г.	1518	40,0	< 0,1	
4	С-3А июль 2005 г.	0,161	0,02	< 0,1	1056/0,8
5	«Атомное» озеро май 2005 г.	3,1	0,2	2,0	—
УВ		7,6	4,9	11	

3.2. Исследование уровня концентрации трития в воздушной среде и почве в местах проведения воздушных, наземных и экскавационных ядерных испытаний

Основным искусственным радионуклидом в подземных водах в настоящее время является тритий (рис. 4.27). В ряде скважин обнаружены концентрации, значительно превышающие УВ. За границами площадки высоких концентраций трития не обнаружено. В подземных водах, распространённых в зонах региональных тектонических разломов, концентрация трития не более 1 кБк/кг, что радиационной опасности не представляет и не превышает УВ.

Для определения удельной активности ^3H и ^{152}Eu на каждом из участков отобрано и проанализировано 11 и 28 проб воздуха и почвы соответственно (табл. 4.9).

Таблица 4.9

Удельная активность трития и европия-152 в почве
[Исследование уровня..., 2013]

№ п/п	Исследуемая территория	Объект	Удельная активность в почве, Бк/кг		Объёмная активность ^3H в почвенном воздухе, Бк/м ³
			^3H	^{152}Eu	
Наземные и воздушные испытания (площадка «Опытное поле»)					
1	Площадка П1	T.1	280 ± 30	440 ± 50	< 0,5
2		T.2	14700 ± 1500	5900 ± 600	
3		T.3	5400 ± 600	3250 ± 350	
4		T.4	9300 ± 100	2300 ± 250	
5		T.5	2100 ± 200	1700 ± 200	
6		T.6	50500 ± 5000	32000 ± 3000	
7		T.7	650 ± 150	360 ± 40	
8		T.8	3299 ± 400	1700 ± 200	
9		T.9	35000 ± 300	18000 ± 2000	
10		T.10	1700 ± 200	1100 ± 100	
11	Площадка П2	T.3	1500 ± 150	760 ± 70	< 0,5
12		T.4	5000 ± 500	2500 ± 200	
13		T.5	11200 ± 1000	5000 ± 500	
14		T.6	3800 ± 400	2300 ± 250	
15	Площадка П3	T.1	1300 ± 130	1100 ± 100	< 0,5
16		T.2	3800 ± 500	2200 ± 200	
17	Площадка П5	T.1	20000 ± 2000	7500 ± 800	< 0,5
18		T.2	17500 ± 2000	7000 ± 700	
19	Площадка П7	T.1	5400 ± 500	3000 ± 300	
20		T.2	4000 ± 400	2000 ± 200	
Эпицентр экскавационного взрыва					
1	«Атомное озеро»	T.1	65000 ± 7000	12500 ± 1500	90 ± 10
2		T.2	55000 ± 4000	6000 ± 500	10 ± 2
3		T.3	8000 ± 700	1400 ± 200	12 ± 2
4		T.5	1650 ± 700	750 ± 60	< 0,5
5		T.6	< 150	< 2	< 0,5
Участки исследования с концентрацией ^3H в почве менее предела чувствительности методики, Бк/кг					
1	Площадка П2	T.1	< 150	20 ± 5	–
2	Площадка П2	T.2	< 150	10 ± 2	–
3	«Атомное озеро»	T.4	< 150	< 2	< 0,5

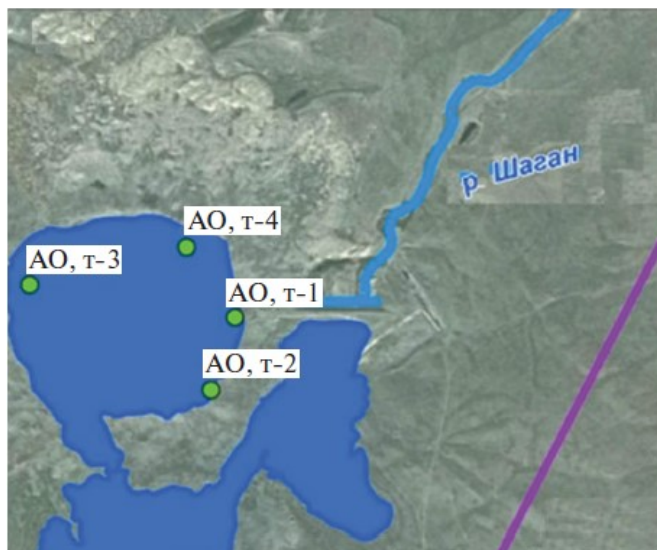


Рис. 4.27. Схема отбора проб на гребне воронки «Атомного» озера [Исследование уровня..., 2013; Влияние радиоактивного..., 2016]

3.3. Исследование распределения трития в воздушной среде в зоне влияния реки Шаган

Река Шаган является левобережным притоком реки Иртыш и протекает с восточной стороны территории СИЯП. Концентрация ^3H в поверхностных, приповерхностных и подземных водах реки может достигать $n \cdot 10^5$ Бк/л.

Исследование распределения ^3H в атмосферном воздухе в русле реки Шаган проводили с определением уровня и характера распространения ^3H в атмосферном воздухе по профилю, заложенному в поперечном направлении относительно русла реки с постепенным удалением от него в правую и левую стороны на расстояние 40 м (рис. 4.28).

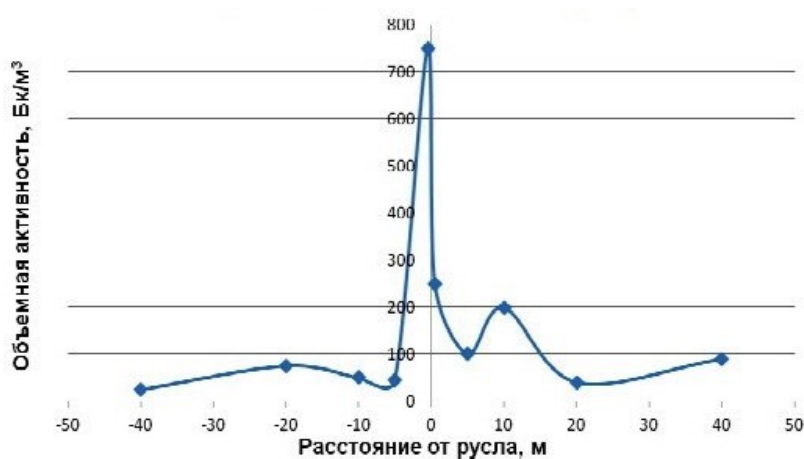


Рис. 4.28. Характер распределения трития в воздухе относительно русла реки [Исследование уровня..., 2013]

На основании полученных результатов было установлено следующее. Объёмная активность ^3H находится в диапазоне 250–750 Бк/м³, его максимальное поступление в воздух закономерно наблюдается в береговой зоне русла (рис. 4.28).

При исследовании распределения трития в почвенном воздухе в зоне влияния реки Шаган и 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, то есть точки отбора были распределены по территории равномерно-случайным образом. На основании этого построено статистическое распределение объёмной активности трития в почвенном воздухе, характеризующее общую картину загрязнения на исследованной территории. При этом было установлено, что распределение подчиняется экспоненциальному закону (рис. 4.29).

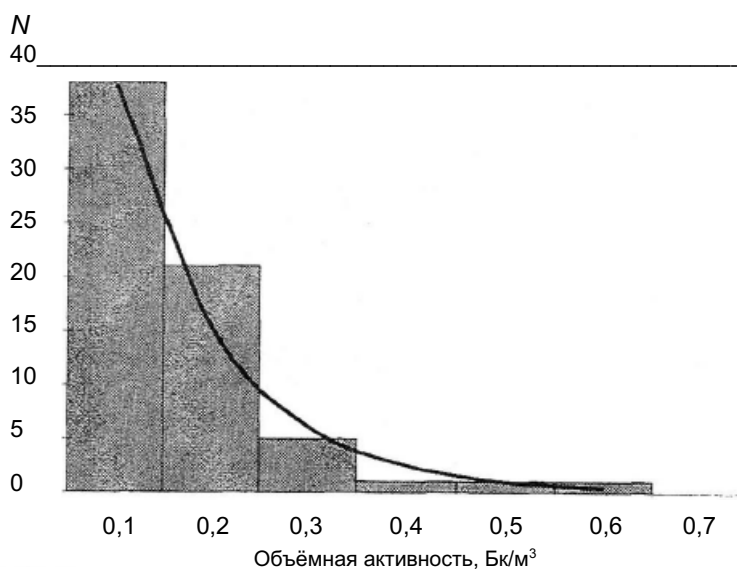


Рис. 4.29. Статистическое распределение результатов измерения объёмной активности почвенного воздуха (сплошная линия — показательная функция, $R^2 = 0,87$) [Исследование уровня..., 2013]

В результате проведённых исследований выявлено, что содержание ^3H в почвенном воздухе варьирует от минимально детектируемых величин (0,03 Бк/м³) до 6 Бк/м³. Максимальное тритиевое загрязнение в зоне влияния реки Шаган приурочено к её руслу и, как в случае с атмосферным воздухом, территориально привязано к месту максимального загрязнения ^3H воды.

Среднее значение содержания трития в почвенном воздухе на данной территории составило 0,11 Бк/м³, медиана — 0,08 Бк/м³, дисперсия — 0,08 Бк/м³ [Исследование уровня..., 2013].

3.4. Тритий в объектах окружающей среды в районе исследования

Тритий, входящий в состав органических веществ, называется органически связанным тритием. Он представляет более серьёзные факторы риска, чем

тритиевая вода при одинаковом количестве поглощения трития, по двум основным причинам. Во-первых, химическая форма влияет на вероятность проникновения трития в состав ДНК или другие биомолекулы. Поскольку β -частицы малой энергии трития не распространяются на большие расстояния, то разница в повреждениях, нанесённых тритием, который сконцентрирован в ядре клетки (где находится ДНК), и тем, который находится в цитоплазме, будет велика. Например, органически связанный тритий, попадающий в организм с пищей, более вероятно войдёт в состав биомолекул, чем тритий, который проникает в организм с питьевой тритиевой водой. Второй причиной более опасного влияния ОСТ является то, что по сравнению с тритиевой водой он, как правило, дольше задерживается в организме. Исследования на людях показывают, что половина тритиевой воды выходит из организма каждые 10 дней, при этом удаление половины ОСТ из организма занимает от 21 до 76 дней. Для некоторых молекул с очень медленной скоростью перехода это время может увеличиться до 280–550 дней. Более длительное время удержания ОСТ в организме вызывает особое беспокойство: если тритий проникает в такие ткани, как нейроны (основные клетки нервной системы) или ооциты (незрелые яйцеклетки). ОСТ и радиоактивная вода могут проникнуть сквозь плаценту и облучить развивающийся плод, что повышает риск врождённых дефектов, выкидышей и других недугов. Исследования животных показывают, что от 1 до 5 % тритиевой воды в организме млекопитающих входит в состав органических молекул.

Помимо непосредственного выхода трития из штолен, существует другой путь его поступления в водоёмы — обмен между парами трития в атмосфере и поверхностью воды. При контакте поверхности воды с атмосферой, содержащей пары трития, последний поступает в воду и растворяется в ней. Помимо этого, он поступает в водоёмы путём вымывания из воздуха осадками и может поступать в почву из водоёмов, загрязнённых тритием, а также в результате поглощения его почвенной влагой из воздуха и с каплями дождя (вымывание атмосферными осадками). Из воздуха, почвы и водоёмов тритий поступает в растительность и животный мир. Из животных, конечно же, поступает в организм человека. Тритированная вода (НТО) замещает обычную воду (H_2O). В организмах и растениях устанавливается соотношение концентраций НТО и H_2O , близкое соотношению в окружающей среде [Иваницкая, Малофеева, 2001].

На восточной части бывшего Семипалатинского испытательного ядерного полигона (вблизи площадки «Балапан») на трёх зимовках ведётся сельское хозяйство, состоящее примерно из 500 лошадей, 500 животных, относящихся к крупному рогатому скоту, 3000 овец. Скот пасётся вокруг «Атомного» озера, пьёт воду из реки Шаган с притоком Ашысу, которые являются самым протяжённым поверхностным водотоком на территории СИЯП, его главной водной артерией. Река Шаган течёт вдоль восточной границы СИЯП и является левобережным притоком реки Иртыш [Исследование уровня..., 2013; Влияние радиоактивного..., 2016; Проведение комплекса..., 2016; Семипалатинский..., 2017]. Исследованы пробы воды самого «Атомного» озера, на расстоянии 300 м до озера и 1 км от него в сторону реки Шаган. Пробы воды из открытого родника, озера отбирались из поверхностного слоя. Содержание трития в исследуемых образцах воды определялись в лаборатории радиологических исследований химического факультета КазНУ имени Аль-Фараби (г. Алматы). Активность

третия в воде определяли с использованием жидкостно-сцинтилляционного счетчика (Liquid Scintillation Counter, Tri-Carb 3100TR, Perkin Elmer).

В поверхностной воде, на расстоянии 300 м до «Атомного» озера (река Ашысу), содержание трития составило 69 Бк/л. В поверхностной воде самого «Атомного» озера содержание трития составило уже 117 Бк/л, а более высокая концентрация — 240 Бк/л обнаружена на расстоянии 1 км от «Атомного» озера в сторону реки Шаган. Полученные нами результаты доказывают, что тритий содержится в поверхностных водах на данных территориях.

По дозиметрическим данным, самые высокие показатели мощности дозы были выявлены в гребне воронки вокруг «Атомного» озера. Мощность эквивалентной дозы на этих местах показала 7,25 мкЗв/ч, что в 29 раз превышает фоновую, плотность потока β -частиц достигает до 17,4 част/см²·мин. Это можно объяснить присутствием здесь площадного загрязнения радионуклидами — продуктами деления и нейтронной активации, образовавшимися в скважине 1004 при экскавационном взрыве. Как уже упоминалось выше, тритий может поступать в почву из водоёмов, загрязнённых тритием, а также в результате поглощения его почвенной влагой из воздуха и с каплями дождя. Из воздуха, почвы и водоёмов он поступает в растительность и животный мир. Кроме того, были исследованы пробы почвы, растений и воды в районе «Атомного» озера.

В результате в почве были обнаружены такие радионуклиды, как ¹³⁷Cs — 7498,6 ± 24,5 Бк/кг, ²⁴¹Am — 891,5 ± 1,8 Бк/кг, ⁴⁰K — 352,9 ± 24,7 Бк/кг, ²³²Th — 170315,7 ± 11070,5 Бк/кг, ¹⁵²Eu — 4610,1 ± 46,1 Бк/кг. В воде «Атомного» озера обнаружены ¹³⁷Cs — 0,5 Бк/кг, ⁴⁰K — 107 ± 4 Бк/кг, ²³²Th — 18,2 ± 4,5 Бк/кг, ²³⁸U — 0,65 Бк/кг. В растениях выявлены ¹³⁷Cs — 62,3 ± 0,1 Бк/кг, ⁴⁰K — 1135,8 ± 93,1 Бк/кг, ²³²Th — 209,7 ± 53,1 Бк/кг, ²³⁸U — 7,33 ± 3,7 Бк/кг. В настоящее время на этих участках до сих пор заготавливается корм для сельскохозяйственных животных, вдоль реки Шаган пастбищное скотоводство ведётся особенно активно.

Более высокие концентрации трития в воде реки Шаган (до 680 кБк/кг) установлены на отрезке, расположенном на расстоянии от 4 до 6 км от «Атомного» озера. Данный участок загрязнён тритием, чему причиной являются подземные воды, поступающие в реку из района скважин площадки «Балапан». Факт высоких концентраций трития отмечен и в береговой растительности реки Шаган — до 65 кБк/кг. Присутствие трития выявлено в продуктах животноводства, получаемых в крестьянских хозяйствах, расположенных на берегах реки Шаган. Содержание трития в пробах молока достигает 5 кБк/кг, что превышает допустимые значения [Ляхова и др., 2007а, б].

Внешнее облучение организма тритием не представляет большой опасности для здоровья. Роговые слои кожи удовлетворительно защищены от β -частиц низкой энергии. Доза тормозного облучения тритием (рентгеновские лучи) ещё меньше, но попадание трития в любой форме в организм представляет потенциальную опасность.

Период биологического полувыведения тритийсодержащей воды для разных людей колеблется от 9 до 14 суток. Из-за низкой растворимости трития в жидкости человеческого организма обычно считают, что опасность облучения тритийсодержащей водой 1000 раз выше, чем опасность облучения газообразном тритием. Биологическое действие трития усиливается тем, что при его распаде образуется инертный газ гелий, поэтому рвутся водородные связи в живых клетках, а это будет негативно влиять как на процесс синтеза органических структур при жизни индивида, так и на наследственность, возможно, отдалённо.

Из этого следует необходимость тщательных исследований и контроля за содержанием трития в окружающей среде и продуктах питания, прежде всего вблизи СИЯП, где его концентрации в окружающей среде значительно выше средних значений [Ляхова и др., 2007а, б; Проведение комплекса..., 2016].

Таким образом, в ходе работы выяснено, что радиоактивное загрязнение окружающей среды в основном обусловлено экскавационным взрывом в скважине 1004 и подземными ядерными испытаниями в «боевых» скважинах площадки «Балапан». По результатам работы было установлено, что в гребне воронки «Атомного» озера величина МЭД превышает в 29 раз глобальную фоновую. Более высокие концентрации трития (240 Бк/л) обнаружены в 1 км от «Атомного» озера в сторону реки Шаган.

Полученные данные γ -спектрометрических исследований подтверждают загрязнённость данной местности и другими радиоактивными веществами, такими как цезий-137, америций-241, уран-238 и т. д., что требует постоянных наблюдений, ведь на этих местах живут люди и пасётся скот.

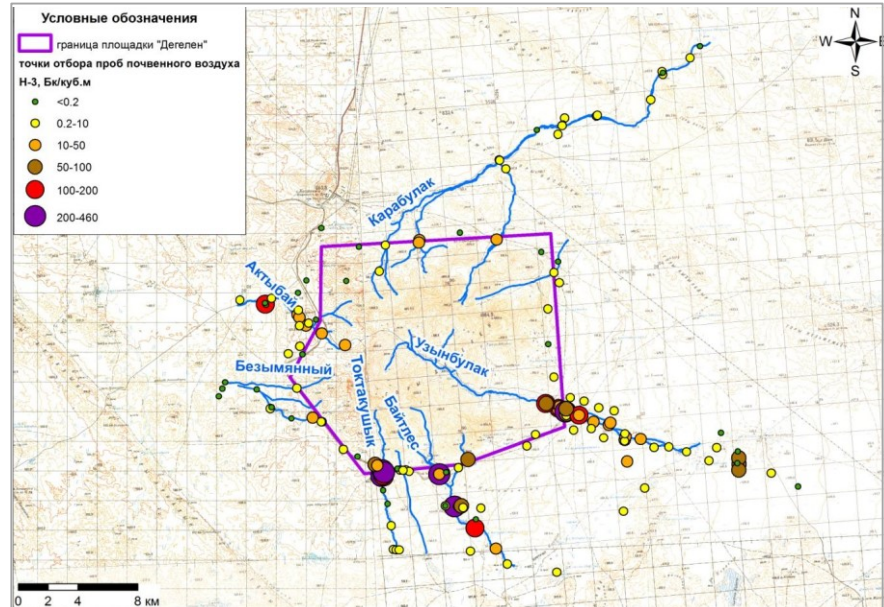
Растения на исследуемых территориях отбирали по видовому составу. Выбор видов был основан на их классификации по отношению к влаге (гидрофиты, произрастающие непосредственно в русле, и фреатофиты, в качестве одного из источников влаги использующие грунтовые воды) и способности накопления ^3H в надземной части, выявленной по результатам предыдущих исследований [Ляхова и др., 2007а, б; Разработка и применение..., 2010]. Основными объектами исследования стали тростник (*Phragmites australis*), ива (*Salix triandra*), чий (*Achnaterum splendens*), чингил (*Halimodendron halodendron*), солодка (*Glycyrrhiza uralensis*) и др. Для получения более точного результата на каждой исследовательской площадке было отобрано по 2–3 вида, относящихся к разным экологическим группам (гидро- и фреатофиты). В общей сложности за пределами горного массива Дегелен за три года исследований было отобрано 160 проб почвенного воздуха и порядка 250 проб растений.

Измерение удельной активности радионуклида трития проводили в подготовленных образцах методом жидкосцинтилляционной спектрометрии на ЖС-спектрометре TRI-CARB 2900 TR [Разработка и применение..., 2010]. Содержание ^3H определяли в свободной воде надземной части исследуемых видов растений, полученной из конденсата посредством ранее изготовленной специальной установки, представляющей собой герметичную ёмкость для загрузки проб растений, снабжённую охлаждаемой поверхностью и ёмкостью для сбора влаги, испаряемой растениями [К вопросу о путях..., 2014].

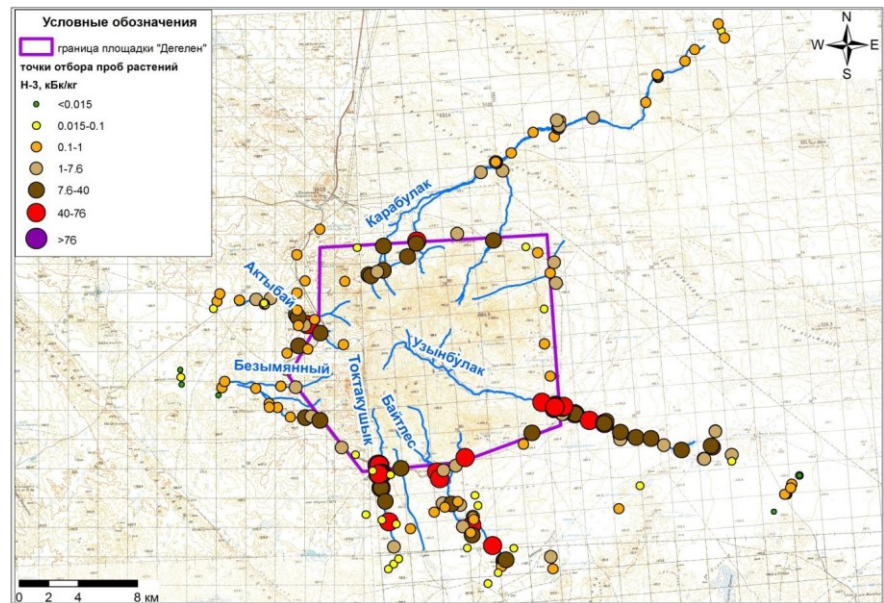
На основании полученных данных объёмной и удельной активности радионуклида ^3H в почвенном воздухе и свободной воде растений построены схемы его пространственного распределения в воздушном бассейне и растительном покрове на границе площадки «Дегелен», а также в зоне влияния основных ручьёв, выходящих за её пределы (рис. 4.30).

Представленные карты-схемы наглядно показывают, что зоны выхода ^3H за границы площадки «Дегелен» в большинстве случаев территориально приурочены к зонам расположения основных ручьёв, берущих свое начало на территории горного массива и выходящих далеко за её 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 основными источниками

поступления ^3H в объекты окружающей среды на данной территории. При этом основное загрязнение тритием и воздушного бассейна, и растительного покрова исследуемой территории приурочено к руслам ручьёв Узынбулак, Байтлес и Токтакушык [К вопросу о путях..., 2014].



a



b

Рис. 4.30. Карты-схемы распределения трития: *a* — в воздушном бассейне (по данным объёмной активности ^3H в почвенном воздухе); *b* — в растительном покрове (по данным удельной активности ^3H в свободной воде растений) [К вопросу о путях..., 2014]

Содержание ^3H в почвенном воздухе находится в пределах от менее 0,2 до 50 Бк/м³ и превышает уровень фона на данной территории от 1,5 до 250 раз. В зоне расположения реки Карабулак его содержание не столь значительно, но даже на расстоянии порядка 9 км от границы площадки отмечена детектируемая объемная активность ^3H в почвенном воздухе. Уровень же концентрации трития в воздухе русла реки Безымянный находится в пределах 0,2 Бк/м³, что является фоновой концентрацией для данной территории [Ляхова и др., 2010а, б; К вопросу о путях..., 2014].

Содержание трития в свободной воде исследуемых растений изменяется от $n \cdot 10^1$ Бк/кг до 85 кБк/кг, зачастую превышая уровень вмешательства при поступлении данного радионуклида с водой, который, согласно нормативным документам [Гигиенические нормативы..., 2022], составляет 7,6 кБк/кг.

По результатам исследования построены графики распределения трития в воздушной среде и растительном покрове вдоль русел основных ручьёв. Для получения общей картины данные по объёмной и удельной активности данного радионуклида по каждому ручью нормированы на максимальные значения (рис. 4.31, I).

Для оценки характера распределения ^3H в воздушном бассейне и растительном покрове в поперечном направлении относительно русел основных ручьёв проведено обобщение данных объёмной и удельной активности ^3H , полученных для почвенного воздуха и свободной воды растений во всех заложенных профилях. Для этого выполнено нормирование всех результатов на максимум по каждому из 18 поперечных профилей и построена зависимость концентрации ^3H от расстояния от центра русла ручья (рис. 4.31, IIa). Как видно из графика (рис. 4.31, IIa), уровень концентрации ^3H в почвенном воздухе уменьшается с расстоянием в сторону от русел ручьёв и так же, как в случае распространения вдоль них, может быть описан экспоненциальным законом. Для растительного покрова (рис. 4.31, IIб) отмечается более сложный характер распределения трития, хотя в целом здесь также наблюдается снижение его концентрации 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 счёт 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 этих источниках будет различна, то и в свободной воде растений будут фиксироваться соответствующие значения удельной активности данного радионуклида. Другим фактором, объясняющим сложившуюся ситуацию, может являться сам характер распространения подземных вод, не имеющий чёткой привязки к руслу поверхностного водотока. В этом случае сравнительно высокие концентрации трития могут отмечаться в растениях на значительном расстоянии от центра русла (в нашем случае — до 2 км), что говорит о широте потока загрязнённых тритием грунтовых вод.

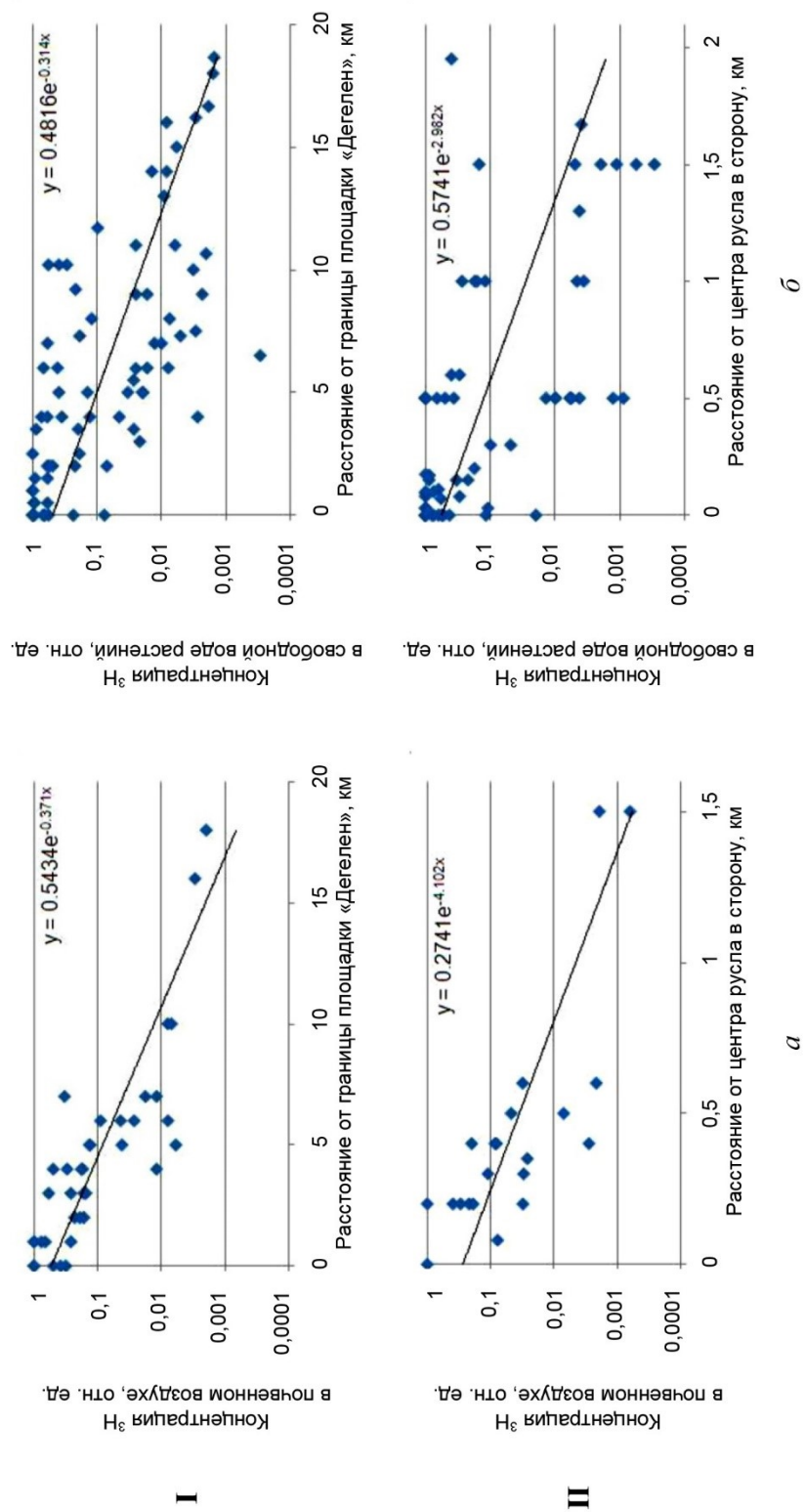


Рис. 4.31. Характер распределения тритика в воздушной среде (*а*) и растительном покрове (*б*) по мере удаления: I — в сторону от русел основных ручьёв; II — от площадки «Дегелен» [Ляхова и др., 2010а, б; К вопросу о путях..., 2014]

Проведены исследования по влиянию трития на морфоанатомическую структуру растений вида Тростник обыкновенный (*Phragmites australis*) [Янкаускас и др., 2021]. В рамках изучения морфоанатомических параметров растений, произрастающих на участках радионуклидного загрязнения СИП, в качестве места обследования выбран район реки Шаган. Исследовательские площадки закладывали вдоль по руслу, всего их 10 (рис. 4.32). Каждая площадка представляла собой участок площадью примерно 1 м². Расстояние между площадками составило от 100 до 1000 м. По результатам измерения мощности эквивалентной дозы и плотности потока β-частиц данные участки можно отнести к фоновым, основные значения МЭД — 0,09–0,10 мкЗв/ч, плотность потока β-частиц — менее 10 част/мин·см². В качестве опытного растения, как ранее отмечалось, выбран Тростник обыкновенный (*Phragmites australis*).



Рис. 4.32. Расположение точек отбора проб [Янкаускас и др., 2021]

В процессе эксперимента в естественных условиях влияние на ход исследования могут оказать абсолютно любые факторы — как биотические, так и абиотические. Таким образом, помимо определения радионуклидного состава, одной из задач стало установление элементного состава воды и растений. Аналогичным образом в местах отбора проб растений выполнен отбор проб воды для проведения химического анализа и определения степени минерализации. Для морфологических исследований отобраны надземные части растения, проведены измерения таких основных параметров, как высота растения, длина метёлки, длина листа. Для исследования анатомических параметров с каждого растения отбирали фрагменты стеблей и листьев, в полевых условиях их фиксировали с использованием копенгагенской смеси, которую готовили путём смешивания: 96 %-й этиловый спирт — 13 мл, дистиллированная вода — 5 мл,

глицерин — 0,5 мл. Данная смесь подходит для фиксации материала, если в дальнейшем его не предполагается обезвоживать и пропитывать парафином [Янкаускас и др., 2021].

Из фиксированных образцов получали препараты для исследования, из них, в свою очередь, готовили срезы с использованием микротомы. Толщина среза образца зависела от состояния растения и жёсткости волокон. В среднем для стебля толщина срезов составила 25–30 мкм, для листьев — 30 мкм. Полученный препарат исследовали при помощи тринокулярного микроскопа Microscope Rose MC 300 (Austria) с цифровой камерой Vision Cam V500/21 (Австрия). При помощи камеры и программного обеспечения BioWizard 4.2 выполняли съёмку и измерение параметров исследуемых образцов.

В качестве исследуемых параметров стебля выбраны: диаметр стебля, толщина эпидермы и склеренхимы, площадь проводящих пучков, расположенных в паренхиме.

В качестве исследуемых параметров листа выбраны: толщина верхнего и нижнего эпидермиса, диаметр пузыревидных клеток эпидермы, толщина мезофилла, площадь проводящего пучка 1-го и 2-го порядка [Янкаускас и др., 2021].

Содержание трития в растениях определялось в свободной воде, полученной в результате конденсации транспирируемой жидкости растениями внутри специальных герметичных установок с водосборниками. Все образцы подготовлены для проведения β -спектрометрического анализа по определению ^3H в свободной воде растений и органической составляющей с использованием автоматической установки для сжигания и подготовки проб для определения органически связанного трития Sample Oxidizer (USA). Измерение ^3H проводилось при помощи жидко-сцинтилляционного спектрометра Quantulus 1220 (США).

Металлы в воде определяли согласно методике СТБ ИСО 17294-2 [Качество воды. Применение..., 2007]. Содержание металлов определяли методом ИСП-МС и ИСП-АЭС с использованием квадрупольного масс-спектрометра Elan 9000 фирмы Perkin Elmer SCIEX (США) в комплекте с компьютером и специализированным программным обеспечением.

За период исследования произведено порядка 8000 измерений анатомических параметров стебля и листа [Янкаускас и др., 2021]. Первым шагом в статистической обработке данных была проверка распределения морфоанатомических параметров на нормальность, которую осуществляли с использованием критерия Колмогорова — Смирнова [Шестаков, 1988]. Для сравнения эмпирического распределения с теоретическим используется критерий λ , рассчитываемый по формуле

$$\lambda_{\text{эмфир}} = \frac{D}{\sqrt{n}},$$

где D — наибольшее значение абсолютной разности между накопленными частотами эмпирического и теоретического распределения; n — объём выборки.

Теоретическое значение λ не зависит от объёма выборки и числа степеней свободы, а определяется только уровнем значимости. Для уровня значимости 0,05 значение λ равно 1,36. Если $\lambda_{\text{эмфир}} < \lambda_{0,05}$, то нет оснований считать,

что эмпирические и теоретические частоты отличаются существенно. Таким образом, в данной работе выполнено сравнение теоретических частот нормального распределения с частотами эмпирического распределения [Янкаускас и др., 2021].

Как следует из расчётов, в подавляющем большинстве случаев $\lambda_{\text{эмпир}}$ меньше $\lambda_{\text{теорет}}$, что говорит о том, что эмпирическое распределение морфоанатомических параметров от нормального распределения отличается несущественно. Исключением являются параметры склеренхимы и площади проводящего пучка в пробах площадки 4. Здесь величина $\lambda_{\text{эмпир}}$ существенно превышает значение $\lambda_{\text{теорет}}$. В данных случаях делается предположение о логарифмически нормальном распределении. Для проверки данной гипотезы от значений параметров склеренхимы и площади проводящего пучка были взяты натуральные логарифмы. Полученные значения были вновь проверены на нормальность распределения с использованием критерия Колмогорова — Смирнова. Расчёты показали, что значения натуральных логарифмов склеренхимы и площади проводящего пучка в пробе площадки 4 распределены по нормальному закону. Тогда исходные значения данных параметров распределены по логарифмически нормальному закону [Янкаускас и др., 2021].

На рис. 4.33 приведено типичное распределение морфоанатомических параметров по частоте встречаемости (эмпирические и теоретические), то есть практическое распределение значений стебля соответствует теоретическому распределению. Таким образом, можно утверждать, что полученные данные достоверны и могут быть использованы для дальнейших аналитических расчётов.

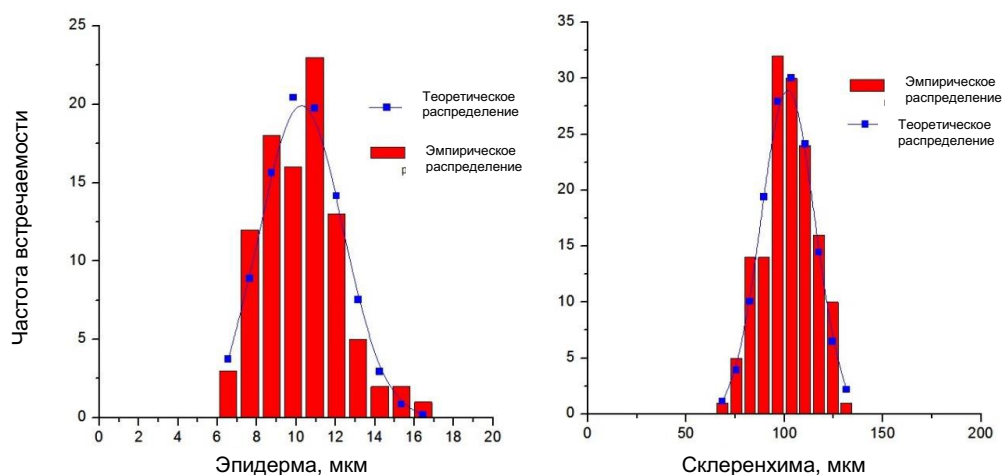


Рис. 4.33. Типичные эмпирические и теоретические распределения анатомических параметров по частоте встречаемости [Янкаускас и др., 2021]

Аналогичным образом получили $\lambda_{\text{эмпир}}$ для всех морфоанатомических параметров листа для каждой площадки. Как и в предыдущем случае, установлено, что в подавляющем большинстве $\lambda_{\text{эмпир}}$ меньше $\lambda_{\text{теорет}}$. Исключением являются параметры мезофилла и площади проводящего пучка 2-го порядка в образцах площадок 2 и 10. Здесь $\lambda_{\text{эмпир}}$ превышает $\lambda_{\text{теорет}}$. В данных случаях делается предположение о логарифмически нормальном распределении.

Для подтверждения идентичности условий произрастания для всех образцов растений и воды проводился элементный анализ (табл. 4.10). Полученные показатели элементного анализа воды для каждой исследовательской площадки соответствуют нормальным значениям для водоёма данного типа и общей минерализации в 5600–7700 мкг/г. Уран, зафиксированный в пробах воды, имеет природное происхождение и обусловлен геохимическими особенностями данного региона. Концентрация элементов в образцах воды находится примерно в одном диапазоне значений, из чего следует, что при обнаружении потенциальных отклонений в растениях влияние элементного состава воды можно исключить.

Таблица 4.10

Элементный состав воды в точках отбора [Янкаускас и др., 2021]

№ п/п	Минерализация воды общая, мкг/г	Содержание элементов в воде, мкг/л				
		Li	Al	Mn	Co	Ni
1	7500	29,0 ± 2,0	10,0 ± 0,1	176,0 ± 0,4	1,4 ± 0,05	6,5 ± 0,1
2	6600	36,0 ± 3,0	6,0 ± 0,3	46,0 ± 1,0	1,7 ± 0,03	6,4 ± 0,5
3	6800	51,0 ± 4,0	4,2 ± 0,3	85,0 ± 1,0	1,8 ± 0,04	7,0 ± 0,2
4	7700	34,0 ± 3,0	5,6 ± 0,1	42,0 ± 1,0	1,2 ± 0,02	4,5 ± 0,2
5	6700	41,0 ± 1,0	7,0 ± 0,3	34,0 ± 1,0	1,0 ± 0,03	3,5 ± 0,4
6	6700	28,0 ± 1,0	6,7 ± 0,6	43,0 ± 0,2	0,8 ± 0,06	0,7 ± 0,1
7	4200	22,0 ± 2,0	8,5 ± 0,1	123,0 ± 1,0	1,0 ± 0,05	4,4 ± 0,5
8	6600	26,0 ± 2,0	9,1 ± 0,2	14,0 ± 0,1	1,0 ± 0,03	3,4 ± 0,4
9	5600	59,0 ± 1,0	4,1 ± 0,1	150,0 ± 1,0	3,2 ± 0,02	10,0 ± 0,2
10	7300	70,0 ± 6,0	12,0 ± 0,4	180,0 ± 2,0	1,8 ± 0,1	8,9 ± 0,4
		Cu	Mo	Pb	U	
1	7500	11,0 ± 0,4	21,0 ± 1,0	0,8 ± 0,04	16,0 ± 0,1	
2	6600	7,0 ± 0,4	14,0 ± 1,0	0,14 ± 0,04	17,0 ± 0,1	
3	6800	9,1 ± 0,3	22,0 ± 0,4	0,2 ± 0,05	27,0 ± 0,4	
4	7700	8,4 ± 0,1	14,0 ± 1,0	0,1 ± 0,01	18,0 ± 0,4	
5	6700	4,6 ± 0,1	17,0 ± 1,0	0,6 ± 0,02	25,0 ± 0,51	
6	6700	3,0 ± 0,1	12,0 ± 0,4	0,4 ± 0,06	16,0 ± 0,1	
7	4200	10,0 ± 0,1	13,0 ± 0,3	0,1 ± 0,04	12,0 ± 0,1	
8	6600	7,9 ± 0,1	14,0 ± 0,3	0,1 ± 0,03	13,0 ± 0,2	
9	5600	10,0 ± 0,2	13,0 ± 1,0	0,2 ± 0,02	31,0 ± 0,1	
10	7300	9,5 ± 0,1	27,0 ± 1,0	9,0 ± 0,2	41,0 ± 0,2	

Для полной картины образцы растений также были проанализированы и данные по химическому составу приведены в табл. 4.11 [Янкаускас и др., 2021].

При анализе полученных данных элементного анализа проб воды и растений и для выявления наиболее важных элементов-загрязнителей использован метод сравнения полученных результатов со встречающимися типичными концентрациями элементов в растениях по данным исследователей

[Horowitz et al., 1974; Laul et al., 1979]. Содержание элементов в растениях для всех исследовательских площадок идентично. Концентрации элементов в растениях на исследовательских площадках не превышают опубликованных данных. Из чего следует, что идентичность условий произрастания опытных образцов установлена и влияние такого фактора, как загрязнение воды и растений металлами, можно исключить.

Таблица 4.11

Содержание элементов в образцах растений

Показатель	Элементный состав				
	Al	Mn	Fe	Co	Ni
Содержание, мг/кг	9–30	170–470	66–100	0,05–0,13	0,9–2,9
Диапазон нормальных значений	до 300	20–400	50–100	0,02–1,0	0,1–5,0
	Cu	Zn	Cd	Pb	U
Содержание, мг/кг	1,3–19,0	4,2–16,0	< п. о. 0,01	0,11–7,0	0,01–0,08
Диапазон нормальных значений	5–23	до 45	0,05–0,2	до 8	0,005–0,08

Таблица 4.12

Содержание трития в свободной воде растений и в органическом веществе [Янкаускас и др., 2021]

№ п/п	Удельная активность ^3H , Бк/кг ($M \pm m$)	
	в свободной воде	в органической составляющей
1	580 ± 60	230 ± 30
2	900 ± 90	390 ± 50
3	$6,5 \cdot 10^4 \pm 0,7 \cdot 10^4$	$2,4 \cdot 10^4 \pm 0,2 \cdot 10^4$
4	$2,9 \cdot 10^4 \pm 0,3 \cdot 10^4$	$5,4 \cdot 10^3 \pm 0,5 \cdot 10^3$
5	$1,3 \cdot 10^4 \pm 0,1 \cdot 10^4$	$4,2 \cdot 10^3 \pm 0,4 \cdot 10^3$
6	$8,0 \cdot 10^3 \pm 0,8 \cdot 10^3$	$2,7 \cdot 10^3 \pm 0,3 \cdot 10^3$
7	$1,0 \cdot 10^3 \pm 0,1 \cdot 10^3$	400 ± 50
8	$1,2 \cdot 10^3 \pm 0,1 \cdot 10^3$	390 ± 50
9	850 ± 90	410 ± 50
10	$5,9 \cdot 10^3 \pm 0,6 \cdot 10^3$	$2,0 \cdot 10^3 \pm 0,2 \cdot 10^3$

Радионуклидный анализ.

На основе лабораторных анализов получены значения удельной активности радионуклида ^3H в свободной воде растений, а также в органической составляющей (табл. 4.12). По результатам проведённых исследований установлено, что удельная активность ^3H в свободной воде растений достигает $6,5 \cdot 10^4$ – $0,7 \cdot 10^4$ Бк/кг, в органической составляющей — $2,4 \cdot 10^4$ – $0,2 \cdot 10^4$ Бк/кг.

Морфоанатомические параметры. Вид *Phragmites australis* — многолетнее травянистое растение. На основе работ (лабораторных и аналитических) произведён

расчёт средних арифметических значений морфологических параметров с ошибкой репрезентативности ($M \pm m$). Высота растений колеблется в диапазоне 110 ± 15 – 150 ± 25 см (норма 100–400 см), длина листа — 22 ± 4 – 30 ± 4 см (норма 5–30 см), метёлки — 15 ± 4 – 19 ± 9 см (норма до 50 см). Значения морфологических параметров соответствуют нормальным встречающимся значениям для тростника *Phragmites australis* [Губанов, 2002].

Стебель полый, трубчатый, волокна жёсткие, диаметр стебля варьирует от $1,7 \pm 0,1$ до $3,4 \pm 0,1$ мм. Покровная ткань, представленная эпидермой, состоит из одного слоя клеток, толщина которых варьирует от $8,4 \pm 0,2$ до $11,0 \pm 0,6$ мкм. Клетки овальной, слегка продолговатой формы. На поперечном срезе видно, что стебель пронизан тяжами проводящих пучков, состоящих из сосудов ксилемы, погружённых в паренхиму (рис. 4.34, а). Площадь проводящего пучка стебля варьирует в пределах от $14,2 \pm 1,0$ до $40,0 \pm 1,0$ мкм².

Листовые пластинки линейно-ланцетного типа. В поперечном срезе толщина листа достигает 160 ± 27 – 220 ± 29 мкм (рис. 4.34, б). Покровная ткань листа представлена однослойным эпидермисом, форма клеток прямоугольная. В зависимости от стороны листа размеры клеток адаксиального (верхнего) и абаксиального (нижнего) эпидермиса различаются. Толщина адаксиального эпидермиса варьирует от $10,6 \pm 0,3$ до $12,6 \pm 0,4$ мкм, абаксиального — от $12,1 \pm 0,3$ до $15,2 \pm 0,6$ мкм. Так как тростник произрастает в достаточно засушливых климатических условиях, то эпидерма листьев выработала защитные приспособления: в засушливое время листья имеют свойство сворачиваться в трубочку за счёт расположения на адаксиальной стороне пузыревидных (водоносных) клеток эпидермиса, расположенных в виде продольных тяжей. Таким образом, пузыревидные (моторные) клетки способствуют сжиманию и разжиманию листовой пластинки, снижая возможность испарения. Диаметры пузыревидных (водоносных) клеток эпидермиса достигают размеров от $75,0 \pm 2,4$ до $110,5 \pm 2,1$ мкм.

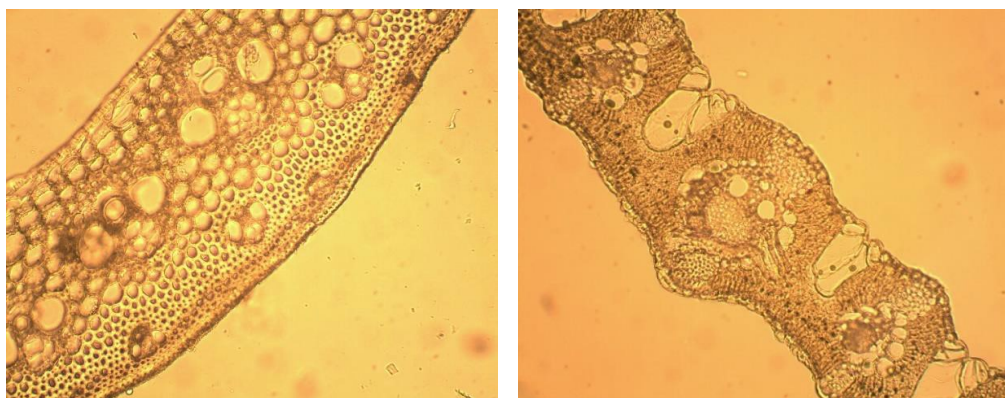


Рис. 4.34. Поперечный срез стебля (а) и листа (б) *Phragmites australis* (x20)
[Янкаускас и др., 2021]

Между двумя слоями эпидермы располагается слой мезофилла (хлоренхима), толщина которого варьирует от $120 \pm 5,1$ до $200 \pm 7,3$ мкм. Клетки неправильной округлой формы либо слегка вытянуты, однородны, размеры различны. Имеются включения в виде хлоропластов, погружённых в цитоплазму клеток мезофилла. Проводящая ткань листа представлена пучками 1-го и 2-го порядков, различающихся хорошо развитыми сосудами ксилемы, осуществляющими перенос воды от корней в листья. Площадь проводящего пучка 1-го порядка варьирует от 13000 ± 1200 до 27000 ± 1600 мкм², площадь проводящего пучка 2-го порядка варьирует от 4200 ± 300 до 13500 ± 600 мкм².

Зависимость анатомических параметров стебля в растениях от содержания трития выявлялась в ходе изучения изменения анатомических показателей стебля и листа от содержания данного радионуклида в свободной воде и органическом веществе [Янкаускас и др., 2021]. Для этого использовался графический способ. При изучении эмпирических рядов, нанесённых на график, установлено, что количественные изменения параметров диаметра стебля и толщины склеренхимы происходят линейно и выражаются уравнением параболы 1-го порядка, то есть прямой $y = a - bx$. При рассмотрении эмпирических рядов регрессии для толщины эпидермы и площади проводящего пучка сделано предположение о том, что в данном случае имеются закономерности параболической ниспадающей, выражаемой уравнением параболы 2-го порядка, вида $y = a + bx + cx^2$.

В результате расчётов установлено, что содержание трития в органически связанном веществе растений изменяется прямо пропорционально содержанию радионуклида в свободной воде и коэффициент корреляции между этими переменными соответствует 0,97 [Янкаускас и др., 2021].

В качестве примера на графиках рис. 4.35 представлен характер изменений анатомических параметров стебля в зависимости от изменений удельной активности трития в свободной воде растений.

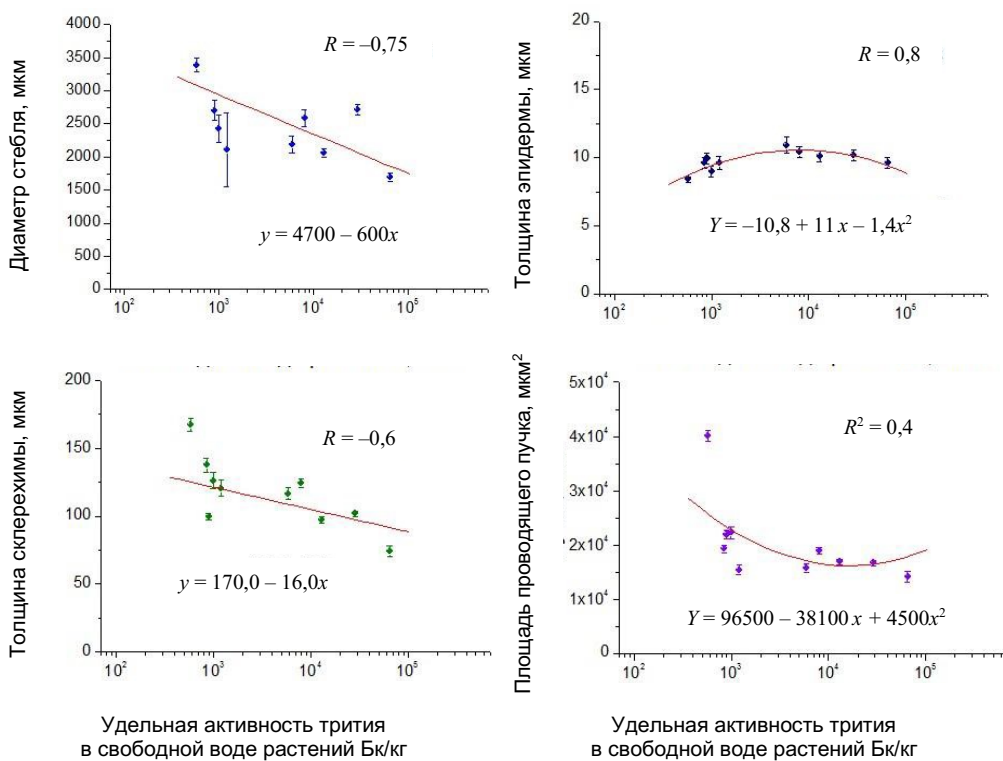


Рис. 4.35. Зависимость анатомических параметров стебля от содержания трития в свободной воде растений [Янкаускас и др., 2021]

При исследовании влияния содержания трития на толщину склеренхимы и диаметра стебля установлено, что при увеличении удельной активности ^3H в диапазоне $n \cdot 10^2 - 10^5$ Бк/кг наблюдается значимое уменьшение анатомических

параметров. Изучение влияния содержания трития на толщину эпидермы и площади проводящего пучка при построении эмпирических рядов регрессии позволило обнаружить иную тенденцию: при увеличении удельной активности трития до значений $n \cdot 10^3 - 10^4$ Бк/кг величина толщины эпидермы возрастает, а затем наблюдается незначительное снижение параметров, значения площади проводящего пучка уменьшаются.

В целом, установлена тенденция изменения анатомических параметров стебля от содержания в них трития. Данный факт подтверждается значимыми показателями коэффициентов регрессии и детерминации, предполагается, что коэффициент детерминации превышает 0,5, коэффициент множественной корреляции в этом случае более 70 %. Такие модели можно признать достоверными и указывающими на функциональную зависимость между переменными.

Изменение анатомических показателей листа от содержания трития в свободной воде и органическом веществе также рассмотрено графическим способом. При изучении эмпирических рядов, нанесённых на график (рис. 4.36), установлено, что количественные изменения параметров верхнего и нижнего эпидермиса происходят линейно и выражаются уравнением параболы 1-го порядка, то есть прямой $y = a + bx$. При рассмотрении эмпирических рядов регрессии для остальных изучаемых параметров сделано предположение, что в данном случае имеются закономерности параболической ниспадающей, выражаемой уравнением параболы 2-го порядка вида $y = a + bx + cx^2$ [Янкаускас и др., 2021].

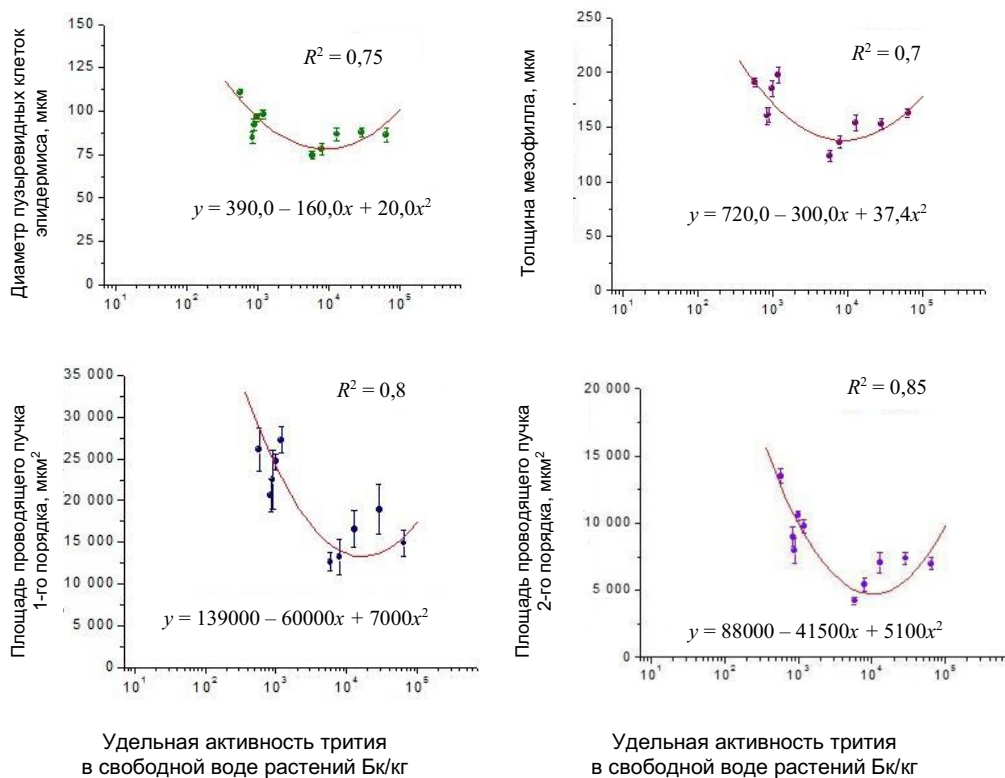


Рис. 4.36. Зависимость анатомических параметров листьев от содержания трития в свободной воде растений [Янкаускас и др., 2021]

При изучении анатомических параметров листа установлено, что толщина верхнего и нижнего эпидермиса с увеличением удельной активности трития в свободной воде не изменяется. Коэффициент регрессии ($R^2 = -0,2 \dots -0,3$) подтверждает отсутствие статистической связи между объясняемой переменной (толщиной эпидермиса) и факторами (удельной активностью трития) [Янкаускас и др., 2021].

При построении эмпирических рядов регрессии для остальных изучаемых параметров, а именно: диаметра пузыревидных клеток, толщины мезофилла, площади проводящих пучков листа 1-го и 2-го порядков — сделано предположение о том, что здесь имеет место закономерность параболической ниспадающей, выражаемой уравнением параболы второго порядка вида $y = a + bx + cx^2$. При увеличении удельной активности трития до значений $n \cdot 10^4$ Бк/кг анатомические параметры листа уменьшаются, достигая минимальных значений. При дальнейшем росте удельной активности ^3H до значений $n \cdot 10^5$ Бк/кг наблюдается общая тенденция к незначительному увеличению анатомических параметров. Коэффициент детерминации ($R^2 = 0,7 - 0,85$) подтверждает наличие статистической связи между объясняемой переменной (диаметр пузыревидных клеток, толщина мезофилла, площадь проводящего пучка 1-го и 2-го порядков) и аргументом (удельная активность ^3H в свободной воде растений) [Янкаускас и др., 2021].

Таким образом, в результате проведённых исследований установлено наличие влияния радионуклида ^3H на анатомическую структуру растения *Phragmites australis*. Произведена статистическая обработка данных. Получено типичное для всех площадок распределение значений анатомических параметров стебля и листа. В ходе исследований установлено, что при увеличении удельной активности ^3H в свободной воде растений до значений $n \cdot 10^3 - n \cdot 10^5$ наблюдается уменьшение таких анатомических параметров стебля, как диаметр, толщина склеренхимы, площадь проводящего пучка. Кроме того, происходит изменение анатомических параметров листа, таких как толщина мезофилла, диаметр пузыревидных клеток, площадь проводящего пучка 1-го и 2-го порядков. Поскольку в данном эксперименте мы имеем дело с внутренним облучением от радионуклида ^3H , можем предполагать, что изменения на анатомическом уровне обусловлены специфичностью трития, который, являясь изотопом водорода, имеет аналогичные свойства и ведёт себя подобно стабильному элементу, то есть способен встраиваться в клеточные стенки растений.

Следовательно, тритий и его образующие представляют серьёзную опасность для населения, проживающего на прилегающей территории бывшего СИЯП. Тритий, попадая в окружающую среду, проникает в организм человека через воздух, продукты питания, питьевую воду. Учитывая достаточно большую подвижность трития в окружающей среде, а также его высокую биологическую активность, можем отметить потенциальную опасность этого радионуклида для окружающих.

РАЗДЕЛ 5. ТРИТИЙ: АККУМУЛЯЦИЯ, ТРАНСФОРМАЦИЯ, ДОЗООБРАЗОВАНИЕ

Глава 1. Наземные экосистемы

1.1. Инкорпорирование трития культурой *Helianthus Annuus* при корневом поступлении

В качестве экспериментального растения выбран подсолнечник (*Helianthus Annuus*), активно возделываемый в Республике Казахстан в качестве масличной культуры. Количественные показатели поглощения и инкорпорирования радионуклида трития при корневом поступлении в растения исследовали в лабораторных условиях [Инкорпорирование трития..., 2021].

В пластиковые вегетационные сосуды (объём 35 л) помещался дренаж, затем в фоновую светло-каштановую суглинистую почву, в лабораторных условиях на которой проращивали *Helianthus Annuus*. Всего подготовлено десять сосудов. Использовались семена, схожие по размеру и массе. В одном сосуде выращивалось не более трёх растений. Для моделирования корневого поглощения ^3H растения в течение вегетационного развития поливали тритированной водой с высокой удельной активностью радионуклида в форме НТО. Вода отбиралась на территории Семипалатинского испытательного полигона каждые 10 дней для имитации естественной динамики НТО в почвенном растворе вегетационных сосудов [Инкорпорирование трития..., 2021].

Сравнительно одинаковые условия произрастания экспериментальных растений создавались системой фитоосвещения и терморегулирования. Исключение аэрального поступления ^3H в течение эксперимента в лабораторном помещении вследствие испарения НТО почвой после полива и транспирационной активности растений обеспечивалось посредством работы вентиляционной системы. Контроль удельной активности ^3H в воде для полива и растительных образцах производился одновременно каждые 10 дней [Инкорпорирование трития..., 2021].

Эксперимент длился до фазы роста семян *Helianthus Annuus* (начало созревания) и составил 65 дней. Каждые 10 дней в течение всего эксперимента рандомизированно производился отбор проб листьев *Helianthus Annuus* в трёхкратной повторности. В конце вегетационного периода, на стадии созревания, дополнительно осуществляли отбор проб частей подсолнечника (стебли, листья, соцветия, корни) для установления характера распределения ^3H в поровой воде тканей (ТПВ) и в органическом веществе. Масса каждого растительного образца в среднем составляла 100–150 г [Инкорпорирование трития..., 2021].

Измерение удельной активности радионуклида ^3H проводилось в поровой воде тканей и органической составляющей растений. Выделение поровой воды растений производилось посредством установки, описанной в работе [Лукашенко и др., 2015]. Установка представляет собой герметичную прозрачную ёмкость для загрузки растительного образца, соединённую с охлаждаемой металлической поверхностью и приёмником для конденсата, извлекаемого из пробы. Отобранный конденсат объёмом 10–15 мл подготавливали для проведения

β-спектрометрического измерения удельной активности трития на жидко-сцинтилляционном спектрометре.

Подготовку проб растений для измерения удельной активности ОСТ проводили методом сжигания сухого растительного образца на установке Sample Oxidizer model 307 (Perkin Elmer, США) с последующей подготовкой полученной воды для проведения β-спектрометрического измерения удельной активности ³H на жидкостно-сцинтилляционном спектрометре.

Определение удельной активности ³H в исследуемых образцах выполняли методом жидкостно-сцинтилляционной спектрометрии, используя спектрометр Quantulus-1220 (Perkin Elmer, США) [Качество воды. Определение..., 2010]. Для анализа проб использовался сцинтилляционный коктейль Ultima Gold LLT, разработанный специально для измерения трития в природных образцах (эффективность регистрации для ³H в диапазоне 0–18 кэВ порядка 60 %). Время измерения для каждого образца составляло около 120 минут. Обработка β-спектра и расчёт концентрации активности ³H проводились с помощью программы Quanta Smart. Минимальная детектируемая активность ³H составляла: для ОСТ — от 4,5 до 7 Бк/л, для НТО — от 2,7 до 5 Бк/л. Коэффициент *R* (Specific Activity Ratio) определяли как отношение удельных активностей ОСТ и ТПВ [Kim et al., 1998; Hui-fang, Ren-tai, 2011]. Скорость образования ОСТ рассчитывали по формуле [Conversion rate..., 2002]

$$v \cdot C_{\text{ТТВ}} = \frac{d \cdot C_{\text{ОСТ}}}{dt},$$

где $C_{\text{ОСТ}}$ и $C_{\text{ТПВ}}$ — активность ОСТ и ТПВ в листьях подсолнечника соответственно, Бк/л; t — время наблюдений (экспозиции), ч; v — скорость превращения ТПВ в ОСТ, % ч⁻¹.

Для количественной оценки переноса ОСТ в растении использовали индекс транслокации (Translocation Index — TLI), который определяется следующим соотношением [Conversion rate..., 2002; Поливкина и др., 2018]:

$$\text{TLI} = \frac{C_{\text{ОСТ}}}{C_{\text{ТТВ}}} 100 \%,$$

где $C_{\text{ОСТ}}$ — удельная активность ОСТ в органах, Бк/л; $C_{\text{ТПВ}}$ — удельная активность ТПВ в листьях.

В период проведения эксперимента с *Helianthus Annuus* измеряли климатические показатели, влияющие на биологическую продуктивность растений (температура и относительная влажность). Температура воздуха изменялась в пределах от 23 до 32 °С, относительная влажность воздуха — от 35 до 55 %, в целом соответствовала нормальным условиям роста *Helianthus Annuus*.

Длительность эксперимента, как отмечалось выше, составила 65 дней до начала созревания. Удельная активность радионуклида ³H в воде для полива в течение эксперимента изменялась от 95 до 540 кБк/л (рис. 5.1), в целом диапазон варьирования составил 1 порядок.

Таким образом, в лабораторных условиях искусственно имитировалась естественная динамика НТО. Изменение значений удельной активности ³H в поровой воде тканей (ТПВ) и органическом веществе (ОСТ) листьев *Helianthus Annuus* на протяжении эксперимента показано на рис. 5.2.

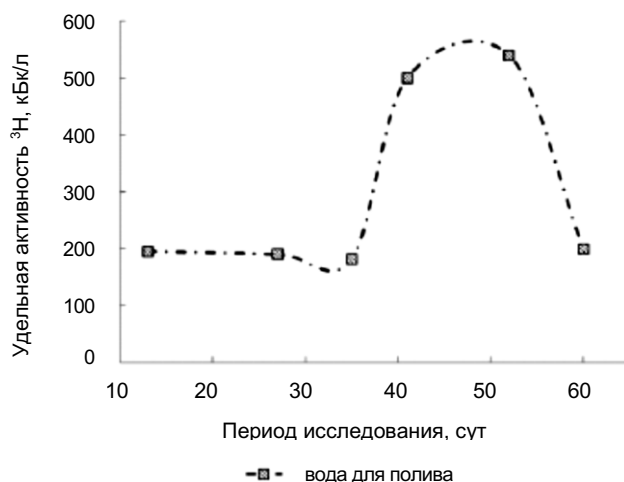


Рис. 5.1. Изменение удельной активности ^3H в воде для полива [Инкорпорирование трития..., 2021]

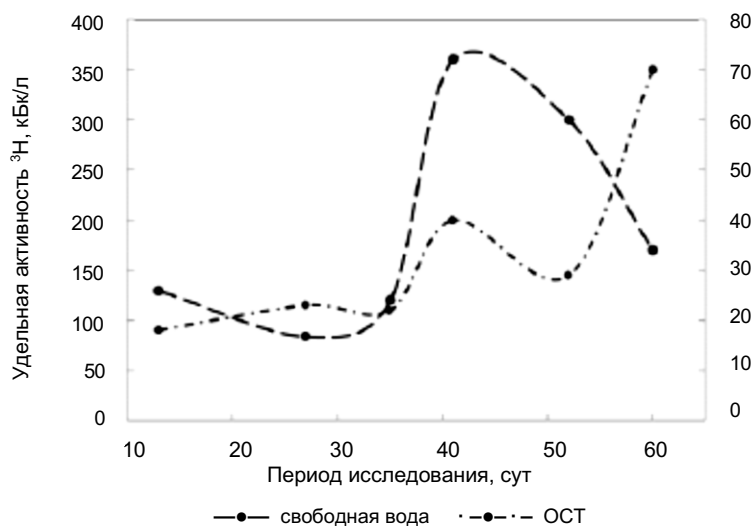


Рис. 5.2. Удельная активность ТПВ и ОСТ в листьях *Helianthus Annuus* [Инкорпорирование трития..., 2021]

Согласно представленным данным, в листьях *Helianthus Annuus* в течение вегетации активность ОСТ ($n \cdot 10^4$) на порядок меньше, чем ТПВ ($n \cdot 10^5$). На основе полученных количественных параметров активности ТПВ и ОСТ рассчитана скорость образования ОСТ в листьях *Helianthus Annuus* (рис. 5.3). В ходе вегетации скорость изменялась в пределах от 0,080 до 0,044 % ч⁻¹.

Максимальная скорость образования ОСТ установлена в фазе активного роста *Helianthus Annuus*, в конце вегетации (стадия роста семян) она снизилась почти в 2 раза. Аналогичная закономерность установлена при исследовании количественных параметров аэрального поглощения ^3H в естественных условиях [Поливкина и др., 2020]. Очевидно, высокая скорость образования ОСТ на ранних этапах развития растений, обусловлена интенсивным биосинтезом [Якушкина,

Бахтина, 2004], а значит, и фотосинтезом, в процессе которого ассимилируется большая часть трития [Tritium in plants..., 2009]. Спад скорости включения ^3H в органические структуры растений в конце вегетации, вероятно, обусловлен старением листовых пластин, следовательно, и хлоропластов, в которых осуществляется фотосинтез [Якушкина, Бахтина, 2004]. Полученная зависимость для скорости образования ОСТ указывает на то, что процесс инкорпорирования радионуклида ^3H в большей степени обусловлен спецификой целого комплекса внутренних физиологических процессов в ходе вегетативного развития растения.

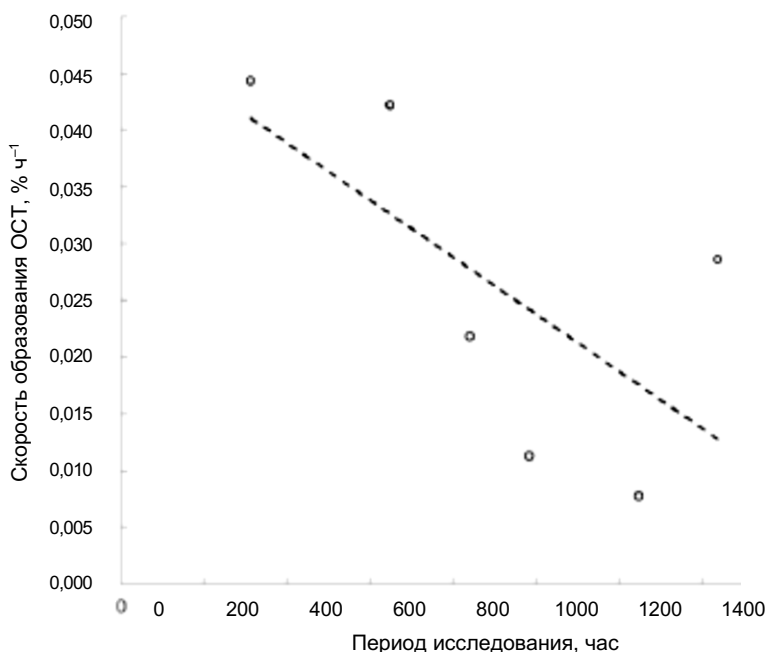


Рис. 5.3. Скорость образования ОСТ в листьях *Helianthus Annuus* [Инкорпорирование трития..., 2021]

Для анализа экспериментально полученных количественных параметров поглощения ^3H культурой *Helianthus Annuus* (табл. 5.1) использовали метод непараметрической статистики — ранговый корреляционный анализ.

Таблица 5.1

Результаты рангового корреляционного анализа [Инкорпорирование трития..., 2021]

Количественные параметры поглощения ^3H		Коэффициент корреляции Спирмена (при $p < 0,05$)
Удельная активность ^3H в воде для полива	ТСВ	0,89
	ОСТ	—
	Скорость образования ОСТ	—
ТСВ	Скорость образования ОСТ	—

Примечание. «—» — отсутствует достоверная корреляционная зависимость.

Согласно данным табл. 5.1, значимая достоверная корреляционная зависимость выявлена только между значениями удельной активности ^3H в источнике поступления радионуклида (воде, используемой для полива) и в поровой воде тканей экспериментальных растений.

Таблица 5.2
Значения R для *Helianthus Annuus*
при корневом поглощении НТО
[Инкорпорирование трития..., 2021]

Период, ч	Фаза вегетации	R
13	Интенсивный рост	0,14
27		0,27
35		0,18
41	Бутонизация	0,11
52	Цветение	0,16
60	Начало созревания (рост семян)	0,41

На основе данных проведённого нами эксперимента получены значения R для культуры *Helianthus Annuus* при корневом поступлении (табл. 5.2), которые можно использовать как маркеры тритиевого загрязнения.

Среднее значение R за период вегетации для *Helianthus Annuus* — 0,21. Характер распределения ^3H по структурным частям *Helianthus Annuus* при корневом поступлении в конце вегетационного периода представлен на рис. 5.4.

Установлено, что в условиях прикорневого поступления трития распределение ТПВ и ОСТ в структурных частях растения имеет различный характер. Активность ТПВ уменьшается в ряду *корни > соцветия > стебли > листья*, в то время как ОСТ — *соцветия > стебли > листья > корни*.

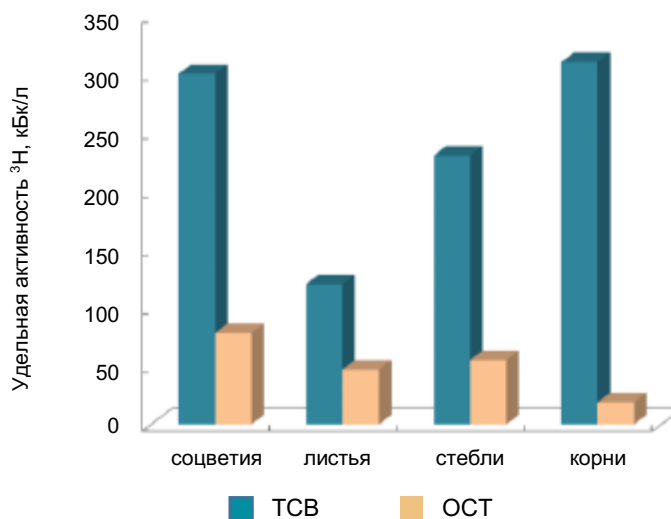


Рис. 5.4. Распределение ^3H по структурным частям *Helianthus Annuus*
[Инкорпорирование трития..., 2021]

Согласно проведённым ранее исследованиям [Поливкина и др., 2020], при аэральном поглощении НТО распределение трития носит противоположный характер, а максимальная удельная активность ТПВ и ОСТ отмечается в надземных структурных частях растений. Это свидетельствует о том, что

на ассимиляцию трития в растении оказывает влияние способ поступления радионуклида [Поливкина и др., 2020].

Индекс транслокации *TLI* при условии прикорневого поглощения ^3H составил 65 %, что почти в 2 раза выше по сравнению с аналогичным значением при аэральном поступлении радионуклида.

1.2. Инкорпорирование трития культурами перца и баклажана при кратковременном воздействии окиси трития

В качестве экспериментальных растений выбраны перец (*Capsicum annuum*) и баклажан (*Solanum melongena*), которые культивируются повсеместно [Инкорпорирование трития..., 2022].

Сценарий кратковременного аварийного выброса трития для экспозиции растений воспроизводили парами НТО. Имитацию аэрального тритиевого загрязнения в лабораторных условиях проводили в камере, оборудованной системой фитоосвещения. На дно камеры помещали поддон с водой, концентрация НТО в которой составляла $5,6 \cdot 10^4$ Бк/л.

Экспозицию НТО в натуральных условиях проводили на бывшей испытательной площадке «Дегелен», вблизи штольни, где проводились подземные ядерные испытания. Данная штольня, несмотря на консервацию портала, характеризуется наличием постоянного радиоактивного водотока с высокой концентрацией НТО как в воде, так и, соответственно, в приземном воздухе в результате эвапорации [Contamination mechanisms..., 2012]. Длительность экспозиции растений составляла 6–8 часов. На время экспериментов почву в сосудах закрывали полиэтиленовой пленкой, чтобы исключить корневое поглощение трития.

Для оценки концентрации соединений трития в урожае растения после экспозиции помещали в чистые условия в хорошо проветриваемое помещение и выдерживали 14 суток до полного созревания плодов, продолжая полив бидистиллированной водой.

Растения предварительно выращивали до стадии созревания в пластиковых вегетационных сосудах (объём 35 л) на фоновой светло-каштановой суглинистой почве, в которую перед посевом вносили комплексные удобрения для обеспечения нормального роста и развития растений. Посев производили сухими семенами, схожими по размеру и массе, из расчёта 2–3 проростка на сосуд. Полив растений осуществляли бидистиллированной водой, поддерживая оптимальную влажность на уровне 60 % от полной влагоёмкости почвы [Инкорпорирование трития..., 2022].

Отбор проб растений проводили во время экспозиции (с интервалом 2 часа) и спустя 14 суток после экспозиции в трёхкратной повторности с разделением на структурные части (листья, стебли, плоды). Масса каждого растительного образца в среднем составляла 100–150 г. Для предотвращения потери трития пробы растений сразу же упаковывали в зип-пакеты и помещали в морозильную камеру (-20 °С). В натуральных условиях использовали портативный холодильник для транспортировки проб [Инкорпорирование трития..., 2022].

Пробы воздуха отбирали с использованием тритиевого коллектора OS 1700 (АМЕТЕК, США). В течение экспериментов измеряли температуру,

относительную влажность, атмосферное давление с использованием термогигрометра «ИВА-6» (Россия). Фотосинтетически активную радиацию оценивали путем пересчёта люксов в микромоли в секунду на метр квадратный [Sharakshane, 2017].

Выделение поровой тритиевой воды и органически связанного трития проводили таким же образом, как и в случае экспериментов с подсолнечником (см. подглаву 1 данного раздела).

Удельную активность трития измеряли методом жидкостно-сцинтилляционной спектрометрии с использованием спектрометра Quantulus-1220 [Perkin Elmer..., 2000], аналогично измерениям, описанным выше (см. подглаву 1 данного раздела).

Для проведения экспозиции выбрана стадия созревания — как вариант наихудшего сценария, так как, согласно ранее проведенным исследованиям [Качество воды. Определение..., 2010], концентрация ОСТ в урожае достигает максимума, когда растения подвергаются воздействию в период активного формирования плода, чем в период ближе к сбору урожая или на ранних стадиях развития. Сведения о концентрации трития в экспериментальных растительных и воздушных образцах представлены в табл. 5.3.

Согласно полученным результатам, активность ТСВ в листьях *Capsicum annuum* в камере на порядок превышала таковую в натурном эксперименте, тогда как для культуры *Solanum melongena* концентрация отличалась всего от 1,3 до 4 раз, что, вероятно, обусловлено уровнями объёмной активности НТО в воздухе при проведении экспозиций. Это подтверждает заметная (по шкале Чеддока) корреляционная зависимость (r -Spearman — 0,61 при $p < 0,05$) между концентрацией трития в воздухе и свободной воде тканей листьев.

Во всех вариантах экспозиции активность ТСВ листьев имела значения на 1–2 порядка выше, чем в других органах (стеблях, плодах), что, очевидно, обусловлено постоянной диффузией НТО с парами воды в мезофилл листа. Также активность ТСВ в большинстве случаев превышала на 1–2 порядка ОСТ, что согласуется с литературными данными [Tissue free..., 2002; Поливкина и др., 2020; Инкорпорирование трития..., 2021; Assessment of the tritium..., 2021] и объясняется механизмами инкорпорирования трития, среди которых приоритетная роль принадлежит фотосинтезу [Tritium in plants..., 2009; Kim et al., 2013; Melintescu, Galeriu, 2017; An updated..., 2018].

Распределение радионуклида в свободной воде тканей органов в целом можно представить убывающим рядом: *листья* < *стебли* < *плоды*. Распределение органически связанной формы радионуклида в растениях имело неоднозначный характер, что, вероятнее всего, обусловлено коротким периодом экспозиции, поскольку транспорт тритированных органических ассимилянтов из листьев является более длительным и физиологически зависимым процессом.

Через 14 суток после экспозиции (табл. 5.3) к моменту полного созревания плодов активность ТСВ, являющейся основным источником для формирования ОСТ, снизилась в листьях на 96 %, в стеблях — на 87 %, в плодах — на 66 %, при этом динамика концентрации ОСТ в листьях и стеблях имела как положительный, так и отрицательный характер, а в созревших плодах осталась практически на том же уровне, что и в конце экспозиции [Инкорпорирование трития..., 2022].

Таблица 5.3

Удельная активность трития в пробах [Инкорпорирование трития..., 2022]

Период	Удельная активность трития, Бк/кг						Объёмная активность ³ H в воздухе, Бк/м ³
	листья		стебли		плоды		
	ТСВ	ОСТ	ТСВ	ОСТ	ТСВ	ОСТ	
<i>Capsicum annuum</i> (камеральный эксперимент)							
2 ч	2900 ± 400	20 ± 4,5	163 ± 24	4,9 ± 1,7	152 ± 18	27 ± 5	23 ± 2,5
4 ч	5000 ± 800	21 ± 4	450 ± 75	4,2 ± 1,7	240 ± 40	17 ± 4	27 ± 2,5
6 ч	8000 ± 1200	47 ± 7	895 ± 30	8,7 ± 2,7	545 ± 80	20 ± 4	55 ± 5,5
14 сут	333 ± 55	59 ± 7	220 ± 32	37 ± 5	390 ± 45	–	< МДА
<i>Capsicum annuum</i> (полевой эксперимент)							
2 ч	166 ± 25	7 ± 2,6	16 ± 2,8	6,1 ± 2,5	5 ± 1	< МДА	7 ± 1
4 ч	182 ± 34	22 ± 6	30 ± 6	5 ± 2,6	6 ± 1,1	14 ± 4	11 ± 1,1
6 ч	284 ± 40	17 ± 4	19 ± 3	7 ± 3	14 ± 2,2	11 ± 3,5	21 ± 2
8 ч	235 ± 30	21 ± 5	20 ± 2,2	10 ± 3	9 ± 1,7	9 ± 3	13 ± 1,3
14 сут	4 ± 3	5 ± 3	< МДА	7 ± 3	12 ± 6	8 ± 4	< МДА
<i>Solanum melongena</i> (камеральный эксперимент)							
2 ч	1100 ± 200	16 ± 5	84 ± 12	23 ± 5	45 ± 8	8 ± 2,7	29 ± 4,3
4 ч	2400 ± 400	42 ± 9	290 ± 45	19 ± 5	106 ± 15	14 ± 4	66 ± 10,0
6 ч	4500 ± 700	46 ± 8	355 ± 55	9 ± 3	330 ± 50	17 ± 5	86 ± 13
14 сут	245 ± 30	12 ± 3	52 ± 6	9 ± 2	106 ± 20	13 ± 4	< МДА
<i>Solanum melongena</i> (полевой эксперимент)							
4 ч	1400 ± 200	32 ± 7	42 ± 7	5,2 ± 2,5	53 ± 8	10 ± 3	4 ± 0,4
6 ч	1190 ± 40	–	33 ± 4	14 ± 6	60 ± 13	14 ± 4	54 ± 5,5
8 ч	1100 ± 200	–	73 ± 11	–	116 ± 17	20 ± 5	33 ± 3,5
14 сут	–	–	–	–	45 ± 7	20 ± 8	< МДА

Примечания: «–» — данные отсутствуют; МДА — минимальная детектируемая активность.

На основании полученных данных рассчитана скорость конверсии трития в органически связанную форму (табл. 5.4). Согласно результатам камерных экспериментов, конверсия трития в листьях *Solanum melongena* в среднем в 2–3 раза интенсивнее по сравнению с *Capsicum annuum*.

На примере *Capsicum annuum* выявлено, что в натурном эксперименте скорость конверсии трития превышала аналогичные показатели в камере от 15 до 30 раз. Необходимо отметить также и то, что во время экспозиции концентрация НТО в камере была в среднем 3,5 раза выше, чем в натурном эксперименте, а активность ТСВ листьев в камере — на порядок выше, чем в полевых условиях (см. табл. 5.3).

Причина различий в скорости конверсии трития, вероятно, заключается в том, что данный процесс в большей степени зависит не от удельной активности ТСВ в ассимиляционной ткани листьев, а от интенсивности протекания

фотосинтеза, в ходе которого формируется основная часть ОСТ [Tritium in plants..., 2009; Kim et al., 2013; Melintescu, Galeriu, 2017; An updated..., 2018].

Таблица 5.4

Скорость конверсии трития в листьях и условия экспозиции
[Инкорпорация трития..., 2022]

Время, час	<i>Capsicum annuum</i>				<i>Solanum melongena</i>			
	ν , % ч ⁻¹	ϕ , %	t , °C	PPDF, мкмоль/с/м ²	ν , % ч ⁻¹	ϕ , %	t , °C	PPDF, мкмоль/с/м ²
Камерный эксперимент								
2	0,34	91	21	28	0,78	91	23	48
4	0,13	92	25	104	0,44	91	22	50
6	0,1	81	41	435	0,17	89	23	58
Полевой эксперимент								
2	–	80	23	668	2,3	31	23	1259
4	2,1	60	30	345	–	15	42	1020
6	3,0	65	29	220	–	19	33	644
8	1,0	60	24	260	–	31	24	603

Примечание. «–» — данные отсутствуют.

Следует отметить, что во всех вариантах эксперимента установлен спад конверсии трития в конце экспозиции от 2 до 4 раз. Наблюдаемая динамика, возможно, вызвана, во-первых, фотосинтетической депрессией вследствие изменения работы устьичного аппарата. Так, в работе [Кособрухов, 2009] показано, что в середине дня повышение устьичного сопротивления приводит к более чем двукратному снижению интенсивности транспирации, которая, в свою очередь, влияет на скорость фотосинтеза. Экспонирование растений в данной работе проводилось в период с 10–11 часов утра до 16–18 часов вечера. Во-вторых, менее интенсивная конверсия трития в лабораторных условиях может быть обусловлена более низкой концентрацией CO₂ камере.

Рассчитан индекс транслокации, который показывает содержание ОСТ в плодах относительно концентрации ТСВ в листьях (рис. 5.5).

Согласно представленным данным, транслокация ОСТ в плоды в натуральных условиях от 2 до 4 раз интенсивнее, чем в лабораторном эксперименте, что указывает на зависимость данного показателя в большей степени от скорости конверсии радионуклида, чем от активности ТСВ в листьях.

Известно, что органически связанная форма трития характеризуется более серьёзными факторами риска по сравнению с НТО. Во-первых, ОСТ может удерживаться в организме до 40 суток, тогда как период полувыведения НТО составляет около 10 дней (для взрослого человека) [Балонов, Чипига, 2016]. Во-вторых, если дозовый коэффициент для трития, поступившего с пищей в виде неорганических соединений (в нашем случае НТО в составе свободной воды тканей), равен $4,8 \cdot 10^{-11}$ Зв/Бк, то для трития, поступившего с пищей в виде органических соединений (ОСТ), — $1,2 \cdot 10^{-10}$ Зв/Бк [Нормы радиационной..., 2009]. Для консервативной оценки использовали данные, полученные в натуральных

условиях с максимальными показателями инкорпорирования трития, как вариант наихудшего сценария. Согласно расчётам, возможный вклад в дозу внутреннего облучения от перорального поступления трития при употреблении 1 кг овощей, загрязнённых в результате кратковременного воздействия, исходя из абсолютной активности форм радионуклида в плодах *Capsicum annuum* и *Solanum melongena*, составит: для ТСВ — 0,7 и 5,6 нЗв; для ОСТ — 1,7 и 2,4 нЗв соответственно [Инкорпорирование трития..., 2022].

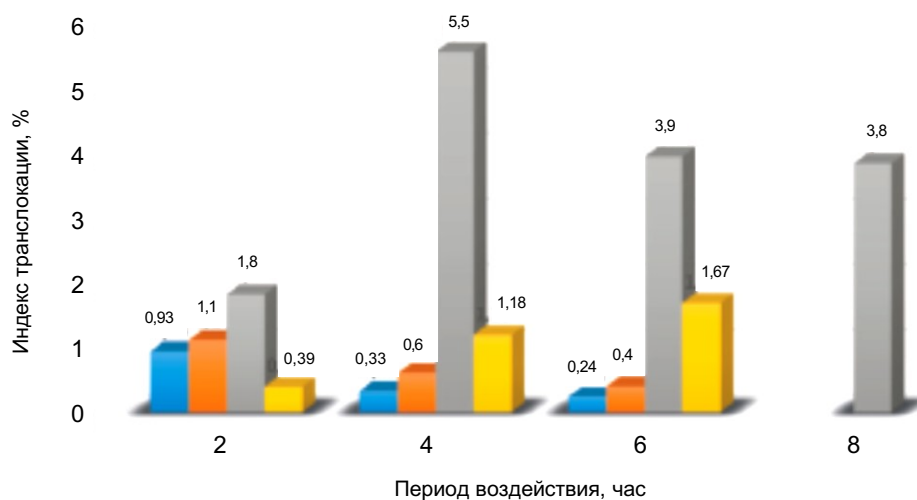


Рис. 5.5. Индекс транслокации в конце экспозиции, % [Инкорпорация трития..., 2022]

Учитывая тот факт, что уровни НТО в выбросах предприятий ЯТЦ [Радиоэкологическая обстановка..., 2015] на несколько порядков ниже, чем экспериментальные, возможный вклад трития в дозу внутреннего облучения населения от перорального поступления с растениеводческой продукцией, подвергшейся кратковременному аэральному загрязнению радионуклидом, будет пренебрежимо мал.

Глава 2. Водная экосистема

2.1. Ассимиляция и трансформация трития при взаимодействии с водными растениями

Процессы, связанные с ассимиляцией и трансформацией трития при взаимодействии с водными растениями, изучались в лабораторных условиях [Бондарева, Субботин, 2016].

Промытая масса элодеи использовалась для накопления трития и определения содержания НТО и ОСТ в контрольной точке (стартовая точка). Для этого исходная биомасса делилась на две части.

В одной из них была отобрана навеска 50 г, из которой выделяли тритий, находившийся в виде НТО. Оставшуюся массу (400 г) взвешивали и отправляли

на сушку (72 ч при $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$). Высушенную биомассу взвешивали и использовали для выделения трития в виде ОСТ ($m \sim 30\text{ г}$).

Вторую часть растений использовали в эксперименте. Для этого побеги растений ($\sim 8\text{ см}$) помещали в аквариум, залитый тритийсодержащей водой, до полного погружения растений (250 г растений были помещены в 2500 мл тритиевой воды). Устанавливался фотопериод — 12/12 часов. Длительность эксперимента составила 11 суток. Отбор проб воды (объём аликвоты — 15 мл) для контроля содержания трития проводили через 24, 72, 96 часов, далее через 168, 216 и 264. Через каждые 24 часа проводили контроль pH. После окончания эксперимента биомассу взвешивали и определяли длину побегов. Из всей биомассы отбирали 50 г, в которой определяли НТО, оставшаяся часть высушивалась (72 ч при $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$) и использовалась для определения ОСТ.

При проведении эксперимента использовали климатическую камеру (объём — $1,6\text{ м}^3$, высота 1,3 м). Скорость кондиционирования воздуха — 100 л/мин, влажность — 50–70 %, температура — около $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Освещение поддерживалось 20 лампами 58-W Phytон. Световой режим — 12/12 часов.

Исследования процессов трансформации НТО в ОСТ в биомассе растений проводили при изменении температуры окружающей среды и режима освещённости. Для этого использовали апикальные побеги зелёных растений (3–4 см), которые были предварительно промыты проточной водой, её излишки были удалены фильтровальной бумагой. Подготовленные растения помещали в цилиндры с одинаковым содержанием трития. Масса побегов составляла 200 г, объём воды — 1,6 л, внесённое содержание трития — 1 кБк/л. Температуру окружающей среды изменяли с помощью термостата, а режим освещённости — с помощью специальных камер, в которых были установлены лампы. Длительность экспериментов — 14 суток. По окончании эксперимента определяли содержание трития в виде НТО и ОСТ [Бондарева, Субботин, 2016].

Длину и массу побегов измеряли в начале и конце эксперимента. Сухую биомассу получали при высушивании при температуре $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ в сушильном шкафу в течение 8 часов.

Для экспериментов по накоплению трития ряской из культуры выбирались трехлистцевые розетки, одинаковые на вид. Для приготовления контрольного раствора в мерный цилиндр наливали 4 мл 100 %-й среды Штейнберга и доводили до 200 мл дистиллированной водой. Полученный раствор разливали в четыре флакона по 50 мл. Для эксперимента с водой из Енисея готовили аналогичную серию контрольного раствора (4 повторности), в котором дистиллированная вода была заменена водой реки Енисей.

Для каждого тестируемого раствора в мерный цилиндр наливали 4 мл 100 %-й среды Штейнберга и доводили до 200 мл дистиллированной водой либо водой реки Енисей. В первый тестируемый раствор внесли: 20 Бк (100 Бк/л), во второй — 60 Бк (300 Бк/л), в третий — 100 Бк (500 Бк/л), в четвёртый — 200 Бк (1000 Бк/л) трития. Во флаконы с готовыми растворами помещали по четыре розетки ряски. Флаконы вставляли в кассету камеры климатостата, в которых поддерживается постоянное освещение (24 ч) и температура $27\text{--}28\text{ }^{\circ}\text{C}$ [Бондарева, Субботин, 2016].

Экспозиция длилась в течение 120 часов, после чего проводили анализ морфологических изменений розеток и прирост площади ряски. Для изучения прироста площади ряски использовали фотоаппарат SONY-A580, делали

фотографии, после чего считали площадь в программе ImageJ [Бондарева, Субботин, 2016].

Накопление трития в экспериментах с ряской определялось по убыли трития из водной среды, которую отбирали через 12, 24, 48, 120 часов после начала эксперимента, по 10 мл из каждого флакона.

Для выявления форм существования трития в исследованных видах водных растений проведено разделение общего содержания трития на тритийсодержащую свободную воду и ОСТ. Для этого при определении общего содержания трития выделялась вся жидкость из сырых растений (в отгонной колбе оставались угольные остатки). Из высушенной второй навески биомассы выделялась жидкость, прочно связанная сбиомассой растений. В первой и второй пробе были определены содержания общего трития и трития в виде ОСТ соответственно. Содержание трития в виде НТО, то есть свободно связанной тритиевой воды, определялось как разность между значениями первой и второй проб [Бондарева, Субботин, 2016].

Расчет доли ОСТ проводился по уравнениям [McCubbin, 2001]:

$$\begin{aligned} (\%) (СВ) &= 100 [m_{\text{сух}}/m_{\text{сыр}}]; \\ (\%) (\text{НТО}) &= 100 [\{^3\text{H}_{\text{сыр}} - ^3\text{H}_{\text{сух}} \cdot \% СВ/100\} / ^3\text{H}_{\text{сыр}}]. \end{aligned}$$

Тогда

$$\text{ОСТ} (\%) = 100 - \text{НТО} (\%),$$

где СВ — содержание сухого вещества, %; $m_{\text{сух}}$ и $m_{\text{сыр}}$ — масса сухого и сырого вещества соответственно, кг; $^3\text{H}_{\text{сыр}}$ и $^3\text{H}_{\text{сух}}$ — содержание трития в сырой и сухой массе соответственно, Бк/кг.

В табл. 5.5 приведены результаты распределения трития по формам в сырой биомассе рдеста и элодеи, отобранных вблизи села Атаманово [Бондарева, Субботин, 2016].

Таблица 5.5

Распределение трития по формам нахождения в биомассе рдеста и элодеи

Форма трития	Сырая масса, Бк/кг / жидкость, Бк/л, (%)			
	Рдест		Элодея	
	лист	стебель	лист	стебель
НТО	15/27 (82 %)	9,5/14,3 (95 %)	42/93,6 (78 %)	22,6/77 (94 %)
ОСТ	3/6 (18 %)	0,5/0,7 (5 %)	12/26,4 (22 %)	1,4/5 (6 %)
НТО + ОСТ	18/33 (100 %)	10/15 (100 %)	54/120 (100 %)	24/82 (100 %)

Примечание. Содержание трития в воде реки Енисей вблизи берега села Атаманово в точке отбора растений на дату отбора — 10 ± 2 Бк/л.

Обнаружено, что содержание трития в листьях рдеста составляет 33 Бк/л, в стеблях — 15 Бк/л, содержание трития в листьях элодеи — 120 Бк/л, в стеблях — 82 Бк/л. Эти значения превышают содержание трития в воде реки Енисей на дату отбора — 10 ± 2 Бк/л.

В жидкости, выделенной из сухой массы растений, достоверно регистрируется тритий в концентрациях, превышающих содержание трития в виде тритиевой воды. Это тритий в форме органических соединений ОСТ. Доля трития в виде ОСТ составила 18 % для листьев рдеста и 22 % для листьев элодеи, для стеблей исследуемых растений доля трития в виде ОСТ значительно меньше и составляет 5 и 6 % для рдеста и элодеи соответственно.

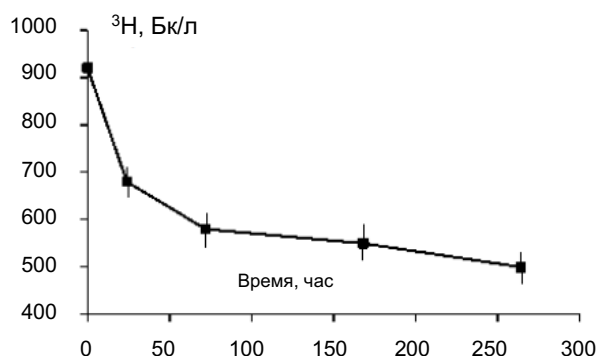


Рис. 5.6. Динамика убыли содержания трития (НТО) в воде модельной системы [Бондарева, Субботин, 2016]

Чтобы оценить накопительную способность трития водным растением (элодея) были проведены специальные лабораторные эксперименты. На рис. 5.6 представлена динамика содержания трития (НТО) в воде экспериментальной модельной системы, содержащей элодею.

Основная убыль трития наблюдалась первые 72 часа после начала эксперимента (~ 25 %). Затем проходил добор трития биомассой элодеи. Общая убыль трития составила примерно 44 %. В табл. 5.6 приведены содержание и распределение трития по видам существования (НТО и ОСТ) в исходной биомассе и после эксперимента.

Таблица 5.6

Результаты определения содержания трития и его распределение по формам связывания с биомассой [Бондарева, Субботин, 2016]

Средняя длина побега, см	Средний вес побега, г		Содержание трития, Бк/кг (доля, %)	
	сырой	сухой	НТО	ОСТ
Исходные побеги				
8,0 ± 0,5	0,59 ± 0,3	0,054 ± 0,005	5,5 (97 %)	0,2 (3 %)
Побеги после эксперимента				
15 ± 1	0,75 ± 0,9	0,047 ± 0,009	141,0 (92 %)	12,2 (8 %)

За время проведения эксперимента длина побегов увеличилась с закономерным ростом среднего веса сырой массы. Кроме закономерного увеличения содержания трития в виде НТО, наблюдалось достоверное повышение и содержания трития в виде ОСТ — с 3 до 8 %. Вероятно, в результате протекающих физиологических процессов, связанных с ростом растений, происходит взаимодействие трития с биологическими макромолекулами, что, в свою очередь, приводит к переходу трития в необменную форму. Тем самым доказывается, что при хроническом взаимодействии трития с биологическими образцами протекают процессы, связанные с интенсивным накоплением и значительным удерживанием трития в биологических структурах организма.

Для выяснения механизмов превращения НТО в ОСТ были проведены эксперименты с побегами водного растения элодея при различных режимах освещённости и температуры окружающей среды [Bondareva, 2018]. В результате получены зависимости содержания ОСТ от температуры окружающей среды (табл. 5.7).

Таблица 5.7

Содержание доли ОСТ в зависимости от температуры окружающей среды [Bondareva, 2018]

$T, ^\circ\text{C}$	9	15	18	20
ОСТ, %	2,5±0,5	7±2	14±3	24±2
$T, ^\circ\text{C}$	22	25	27	30
ОСТ, %	29±3	32±3	21±2	15±1

Обнаружено, что доля трития в виде ОСТ в элодее сильно зависит от температуры окружающей среды. Оптимальная температура составляет приблизительно 25 °С (табл. 5.7).

Эксперименты, в ходе которых исследовалось влияние освещённости на содержание доли ОСТ в растении, показали (табл. 5.8), что наибольшая доля ОСТ характерна для режима *день 6 часов / ночь 18 часов*.

Таблица 5.8

Содержание ОСТ (% от общего содержания трития) в биомассе растения в зависимости от режима [Бондарева, Субботин, 2016; Bondareva, 2018]

День/ночь, ч	24/0	18/6	16/8	12/12	6/18	0/24
ОСТ, %	3 ± 1	6 ± 2	9 ± 2	15 ± 3	35 ± 3	22 ± 2

При проведении экспериментов с ряской максимальная убыль радионуклида в воде зафиксирована через 24 часа от начала экспериментов (во всех внесённых активностях) и составила 35 %. Оставшееся время проходил добор активности. В конце всех экспериментов в водной среде содержание трития составило, Бк: 8 (40 Бк/л), 25 (125 Бк/л), 45 (220 Бк/л) и 115 (575 Бк/л), что соответствовало 40, 42, 45 и 57,5 % от внесённых количеств радионуклида.

Исходные пробы ряски (*a*), а также пробы в конце экспериментов: контрольной системы (*б*) и с максимальной активностью трития в средах с дистиллированной водой (*в*), с водой реки Енисей (*г*) представлены на рис. 5.7.

Несмотря на накопление трития растением, все внесённые активности трития не повлияли на внешний вид ряски: не выявлено некрозов, хлорозов и других физиологических изменений. Однако наблюдалось увеличение количества листочков: вместо 6 в контроле, по 8 в системах с максимальным содержанием трития как с водой реки Енисей, так и с дистиллированной водой. Кроме того, обнаружено увеличение площади листочков в системах с внесёнными активностями трития (по сравнению с контрольными системами), особенно в системах с водой реки Енисей (табл. 5.9).

В системе с водой реки Енисей прирост площади наблюдался больший по отношению к контрольным образцам, чем при использовании дистиллированной

воды. Вероятно, это связано с наличием растворённых веществ в речной воде, которые способствуют более интенсивному росту растений.

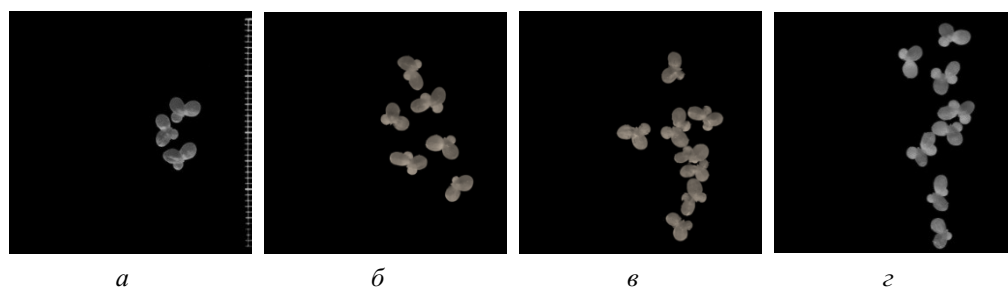


Рис. 5.7. Внешний вид ряски: *a* — исходная; *б, в, з* — в конце эксперимента: контроль, вода дистиллированная и вода реки Енисей соответственно, 1000 Бк/л (*в, з*) [Бондарева, Субботин, 2016; Bondareva, 2018]

Таблица 5.9

Изменение площади листочков ряски в модельных системах, мм²
(% увеличения площади по отношению к контролю)
[Бондарева, Субботин, 2016]

Содержание внесённого трития, Бк/л				
0 — контроль	100	300	500	1000
Вода реки Енисей				
2,1 ± 0,1 (0)	2,4 ± 0,1 (14,0 ± 0,6)	2,6 ± 0,1 (23,8 ± 0,9)	2,7 ± 0,1 (29 ± 1)	2,9 ± 0,2 (38 ± 2)
Дистиллированная вода				
2,0 ± 0,1 (0)	2,1 ± 0,1 (5,0 ± 0,2)	2,1 ± 0,1 (5,0 ± 0,2)	2,2 ± 0,1 (10,0 ± 0,5)	2,4 ± 0,1 (20,0 ± 0,8)

По результатам проделанной работы сделано заключение о том, что содержание ОСТ зависит от режима освещённости. Трансформация НТО в ОСТ протекает преимущественно в ночной период в результате физиологических процессов. Известно, что скорость образования ОСТ в растениях составляет 1/5–1/3 от дневной скорости [Hill, Johnson, 1993; Murphy, 1993; Bondareva, 2018; NCRP..., 1991; Thompson, Nelson, 1971], однако образование в течение ночного времени до сих пор ещё мало изучено. Известно, что в течение дня растения в процессе фотосинтеза с помощью энергии, получаемой из солнечного света, превращают углекислый газ с использованием воды в сахара, последние (в том числе крахмал) потом идут в пищу самому растению, поставляя молекулы и энергию делению клеток, сборке биологических макромолекул, поддержанию физиологических процессов и т. д. Таким образом, поступивший с водой атом трития встраивается в структуры растения в результате процессов фотосинтеза, протекающих в тёмное время суток [Thompson, Nelson, 1971; NCRP..., 1991; Hill, Johnson, 1993; Murphy, 1993; Bondareva, 2018].

В связи с тем, что полученные оптимальные условия трансформации трития из НТО в ОСТ не являются реальными для исследуемого региона (река Енисей), обнаруженное содержание ОСТ в реальных биологических объектах значительно

ниже полученных в модельных экспериментах и не превышает 22 % ОСТ от общего содержания трития в водном растении.

Таким образом, результаты исследований показали, что при взаимодействии с биомассой водного растения (элодея) тритий присутствует главным образом в виде свободной тритиевой воды и незначительно — в виде ОСТ, при этом трансформация трития из НТО в ОСТ происходит преимущественно за счёт физиологических процессов, протекающих в тёмное время суток.

2.2. *Ассимиляция трития в системах «вода — икра» и «вода — водные растения — рыба». Оценка воздействия трития на исследуемые организмы*

Ввиду того, что изучаемая экосистема реки Енисей, как и любая пресноводная экосистема, сложна в плане взаимодействия как внутри системы, так и по уровню воздействия на население, изучалось накопление трития в системах «вода — икра», «вода — водные растения — рыбы».

Среди живых организмов, обитающих в загрязняемых водоёмах, рыбы, в силу биологических особенностей, являются наиболее подходящими объектами исследования, позволяющими оценить среднесрочные процессы трансформации водоёмов. Рыбы чувствительны к широкому множеству прямых воздействий и интегрируют неблагоприятные эффекты всего комплекса различных воздействий, включая и влияние на другие компоненты водной экосистемы (среда обитания, макробеспозвоночные, первичная продукция и т. д.). Дозовые нагрузки на организм рыб формируются за счёт внешнего облучения — от воды и донных отложений и внутреннего — от инкорпорированных радионуклидов [NCRP..., 1991; IRIS/HEAST, 2016; ICRP, 2017; Ракитский и др., 2018].

Результаты экспериментов на животных непосредственно не могут переноситься на людей, однако биологическая эффективность слабой β -эмиссии в разных условиях облучения может рассматриваться и для оценки радиотоксичности трития по отношению к человеку [Беловодский, 1985]. Тритий способен замещать водород в молекуле ДНК, что может привести к увеличению периода его выведения из организма и, следовательно, к возрастанию риска отдалённых последствий облучения, в том числе канцерогенного риска.

В качестве объекта исследований был взят используемый в пищу наиболее распространённый вид рыб — карась серебряный (*Carassius gibelio*). Рыбы этого семейства достаточно легко разводятся в искусственных водоёмах, а также малоприхотливы к качеству водоёма и потребляемой пище. В связи с этим вид нашёл распространение в прудах отстойниках, в прудах при тепловых станциях [Bondareva, 2011, 2015, 2017, 2018; Bondareva, Schultz, 2015; Выявление путей..., 2017; Бондарева, 2020].

В первой части эксперимента изучалось влияние трития на эмбриогенез икры карася.

Для проведения экспериментов использовалась промышленная оплодотворенная икра карася. В каждую модельную систему вносилось до 125 г икры. В течение всего исследования икра находилась в водонепроницаемом контейнере для предотвращения смыва икры в фильтрующее устройство. Объём водной среды в каждом случае составлял 50 л, в которую до внесения икры вносился тритий в виде тритиевой воды: 500, 5000 и 50 000 Бк/л. В качестве

контрольной рассматривалась система, куда тритий не вносился, за исключением ранее присутствующего фонового содержания (~4 Бк/л) [Bondareva, 2017].

В течение всего периода эмбриогенеза (25 дней, температура $8,5 \pm 2,5$ °С) модельные системы находились в инкубационных системах. Через 25 дней воздействия трития с разной активностью часть мальков карася были изъяты из систем с тритием и подвергнуты исследованиям [Bondareva, 2015, 2017, 2018, 2020; Bondareva, Schultz, 2015; Выявление путей..., 2017].

Другая часть была помещена в аквариумы с чистой водой для доращивания и использования в следующих экспериментах и питалась чистым кормом.

На втором этапе эксперимента проводилось накопление трития водными растениями, которые в последующем использовали в качестве корма рыбам. Экспериментальной средой служила вода, отобранная в реке Енисей. В качестве растений-гидробионтов использовали роголистник и ряску. Ряска была выращена в лабораторных условиях, роголистник был взят в реке Енисей, в пункте отбора воды. Непосредственно перед экспериментом проводился анализ используемых водных растений для получения исходных данных по содержанию трития, микро- и макрокомпонентов. Предварительно воду профильтровали через мембранные фильтры с диаметром пор 0,2 мкм.

Стандарт тритиевой воды (Packard Bioscience Ltd) с концентрацией 33 кБк/мл использован для получения экспериментальных сред.

На втором этапе растения-гидробионты накапливали биомассой тритий, внесённый в количестве 10 МБк на аквариум объёмом 100 л. Удельная активность составила 100 кБк/л. Тритий вносили в виде свободной тритиевой воды. Масса (сырой вес) каждого из растений (роголистник и ряска) составляла 3000 г. Процесс накопления растениями трития сопровождался мониторингом содержания радионуклида в водной среде.

Условия проведения эксперимента следующие: климатическая камера (объём — 1,6 м³, высота — 1,3 м) использовалась для создания рабочих условий; скорость кондиционирования воздуха — 100 л/мин; влажность поддерживалась на уровне 50–70 %; температура — около 15 °С; освещение поддерживалось 28 лампами 58-W Phyton.

Длительность экспериментов по накоплению трития растительной биомассой составляла от 168 (для ряски) до 336 часов (для роголистника). Окончание экспериментов фиксировалось по выходу на насыщение линии убыли трития из водной среды плюс период стабилизации систем [Выявление путей..., 2017; Бондарева, 2020].

На третьем этапе эксперимента в аквариумы со свежееотфильтрованной водой помещалась молодь исследуемого вида рыб (после первого этапа эксперимента), которым вместе с кормом добавляли растения из первой части эксперимента: в одном аквариуме добавляли ряску, во втором — роголистник. Третий аквариум служил в качестве контроля. Растения, содержащие тритий, были высушены в атмосфере азота при температуре примерно 45 °С, чтобы предотвратить обмен трития с атмосферой лаборатории. После чего полученные безводные концентраты смешивались с сухим кормом для рыб, состоящим из смеси животных и растительных остатков (1:1). Смесь формовалась в гранулы массой 0,3 г и хранилась в герметичной упаковке до полного расходования в эксперименте. Содержание трития в каждой грануле составляло примерно 50 Бк. Другие компоненты, входящие в корм: кукурузная мука, рыбий жир,

соевый протеин, соевое масло, витамины, минералы и др. Гранулы не были гомогенизированы. Тритийсодержащие гранулы служили в качестве добавки к рациону. В каждой экспериментальной системе ежедневно скармливалось 600 Бк трития, при этом для максимального предотвращения потерь радионуклида каждая гранула насильственно вносилась в ротовую полость каждой особи. Максимальное внесённое количество трития составило 330 кБк на особь.

Продолжительность третьей части эксперимента составляла 550 суток с промежуточным отбором из каждого аквариума по три особи через 250 суток. Длительность эксперимента была выбрана с учётом того, что тритий, находящийся в необменной форме, имеет период полувыведения около 500 суток.

На каждом этапе рыбы вынимались из воды и аккуратно высушивались бумажными полотенцами, но не промывались. После этого каждая особь была измерена и взвешена.

Во всех случаях проводилось препарирование всей рыбы на фрагменты: чешуя, кожа с плавниками, жабры, скелет вместе с головой, мышечная масса, кишечник со всем содержимым, желудок со всем содержимым.

Мышечная масса каждой особи была взвешена и разделена на три части: из одной части определяли содержание общего трития, а вторую и третью использовали для определения содержания трития, связанного с липидами и протеинами соответственно.

Особь, находившиеся в контрольной системе, анализировались на общее содержание липидов, золы, видов и массы белков. Данные исследования проводились в соответствии с рекомендациями, разработанными для анализа рыб [ГОСТ 31795–2012, Правдин, 1966], полученные результаты использовались для расчётов доли распределения трития по составным частям и соблюдения баланса по основным компонентам исследуемого организма. В составных частях экспериментальных особей определяли содержание связанного с ними трития, с последующей интерпретацией данных.

Особое внимание уделялось печени, которая предварительно была очищена от всех сосудов. В печени контрольных образцов определялось содержание общих липидов, белка, фосфолипидов, холестерина, триацилглицерина [Bondareva, 2018; Бондарева, 2020; Ракитский и др., 2020]. Полученные данные использовали при оценке вклада каждой составляющей в связывании трития.

Определение содержания трития в атмосфере климатической камеры проводилось с использованием традиционной методики [Методы измерения..., 1978; Методические рекомендации..., 1980].

В течение всего эксперимента с периодичностью один раз в две недели со дна аквариума отбирали растительные остатки и продукты жизнедеятельности рыб. Во всей этой смеси также определяли тритий.

Через 250 суток после начала третьей стадии исследований часть рыб вынимали из экспериментальных систем и помещали в чистые условия с чистым кормом. По окончании следующих 300 суток, аналогично рыбам в экспериментах по накоплению трития, определяли содержание трития в составных частях рыбы. По полученным результатам рассчитывали период полувыведения трития. В табл. 5.10 приведены сведения о химическом составе и физических показателях воды, использованной в настоящих исследованиях.

В экспериментах также контролировались такие параметры воды, как pH, растворённый кислород, температура, электропроводность, содержание NO_2^- , $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$, NO_3^- .

Таблица 5.10

Химический состав и физические показатели воды
[Бондарева, 2020; Ракитский и др., 2020]

Элемент	Содержание	Элемент	Содержание	Элемент	Содержание
В миллиграммах на литр					
C	46,0 ± 3,0	Na	4,0 ± 0,2	Mg	2,1 ± 0,1
Si	8,0 ± 0,4	S	4,2 ± 0,2	Fe	2,8 ± 0,2
Cl	3,3 ± 0,2	Ca	1,9 ± 0,1	Al	6,2 ± 0,3
В микрограммах на литр					
P	460,0 ± 23,0	Cu	1,10 ± 0,05	V	5,0 ± 0,3
K	190,0 ± 8,0	Zn	16,0 ± 1,0	Sr	460,0 ± 20,0
В нанограммах на литр					
Cd	180,0 ± 6,0	Bi	7,8 ± 0,4	Th	4,6 ± 0,2
		U	160,0 ± 8,0		
В беккерелях на литр					
³ H	4,0 ± 2,0	⁹⁰ Sr+ ⁹⁰ Y	0,217 ± 0,098	²¹² Pb	0,165 ± 0,091
²¹⁴ Bi	0,262 ± 0,052	²¹⁴ Pb	0,27 ± 0,09	²³⁴ Th	0,63 ± 0,42

Примечание. Физические показатели воды: pH — 7,6, температура — примерно 7 °С, минерализация — 0,08 г/л.

Ассимиляция трития в системе «вода — икра».

Эмбриональный период развития — это не только выход зародыша из оболочки, он включает в себя период в течение некоторого времени после выклева, пока предличинка, обладая ещё рядом эмбриональных особенностей строения органов дыхания, кровообращения и пищеварения, проходит заключительные этапы эмбрионального развития. По окончании первого этапа в каждой экспериментальной системе рассчитывалось количество погибшей икры, количество мальков с аномалиями в развитии и количество мальков с развитием, близким к физиологическому. Результаты приведены в табл. 5.11.

Таблица 5.11

Эффект воздействия тритиевой воды на развитие икры карася
через 25 дней после начала эксперимента [Bondareva, 2017]

Уровень внесения трития, Бк/л	Количество икринок		
	всего, шт.	погибших, шт. (%)	с аномальным развитием, шт. (%)
Контроль	3500±150	280±20 (9)	250±15 (7)
500	7600±200	850±15 (11)	750±20 (10)
5000	3500±100	700±10 (20)	1100 ±100 (30)
50000	4400±200	950±30 (20)	1400±50 (30)

По истечении 25 суток и при появлении основной массы мальков часть их подвергалась исследованиям (взвешивание, определение длины и проч.).

По оценке внешних признаков на уровне воздействия трития, примерно равном (5000 Бк/л) или превышающем (в 6,5 раза) уровень вмешательства (7700 Бк/л), явный радиационный эффект проявляется только на стадии развития икры. При этом доля погибших икринок и мальков с аномальным развитием в системах с 5000 и 50 000 Бк/л сопоставима [Bondareva, 2017].

Большая часть мальков из системы с внесением 50 000 Бк/л была помещена в чистую среду (чистая вода, чистый корм), где оставалась для подращивания и последующего использования. Мальки из модельных систем с внесением 500 и 5000 Бк/л в дальнейших исследованиях не использовались.

В табл. 5.12 приведены результаты изменения длины мальков в условиях дорастивания в чистой воде, где в качестве пищи использовался чистый корм. В таких условиях мальки находились в течение 150 суток, до начала проведения третьего этапа эксперимента [Бондарева, 2020; Ракитский и др., 2020].

Таблица 5.12

Изменение длины мальков рыбы по отношению к контрольной системе

Модельная система	Возраст, сут	Количество, шт.	Длина, мм	
			Средняя (разница по отношению к контролю, %)	Диапазон
Контроль 50 000 Бк/л	35	800	17 ± 1	16,8–17,4
		1050	18 ± 1 (1,1 %)	17,6–18,1
Контроль 50 000 Бк/л	76	500	28,3 ± 2,8	27,8–28,9
		500	28,4 ± 2,4 (0,4 %)	28,0–28,9
Контроль 50 000 Бк/л	125	206	65,7 ± 6,6	65,0–67,0
		203	70,6 ± 6,7 (9,7 %)	69,6–77,5
Контроль 500 00 Бк/л	150	75	80,3 ± 8,6	88,3–92,2
		97	81,7 ± 7,9 (2,2 %)	70,1–93,3

Максимальная разница длины выявлена только у мальков на 125-е сутки (9,7 %), однако уже на 159-е сутки эта разница уменьшилась в несколько раз.

Так как молодь рыбы после 150 суток дорастивания использовалась в третьей стадии эксперимента, морфологические параметры изучались в ограниченном количестве рыб. Отобранные образцы молоди использовали и при определении химического состава.

Ассимиляция и трансформация трития в системе «вода — растения — рыба». Период полувыведения.

На второй стадии эксперимента проводилось изучение накопления трития некоторыми водными растениями [Bondareva, Schultz, 2015; Бондарева, 2020; Ракитский и др., 2020].

На рис. 5.8 приведена динамика убыли трития в модельных системах на этапе накопления трития исследуемыми гидробионтами и данные о содержании трития в атмосфере климатической камеры. Как можно заметить, основная убыль

трития наблюдалась первые 48 часов от начала эксперимента, затем проходил добор радионуклида биомассой. Общая убыль трития составила от 60 до 70 % от исходной активности для ряски и роголистника соответственно.

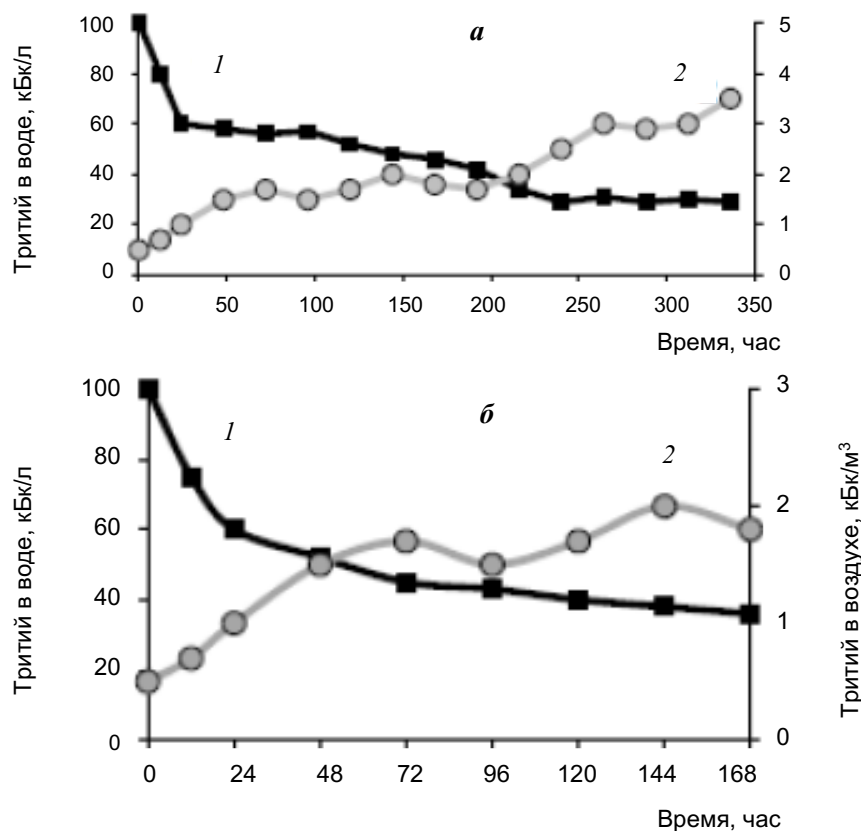


Рис. 5.8. Динамика содержания трития в воде экспериментальных систем (1) и в атмосфере климатической камеры (2): а — с роголистником, б — с ряской [Bondareva, Schultz, 2015; Бондарева, 2020; Ракитский и др., 2020]

Условия проведения экспериментов были выбраны оптимальными, чему следствием явилось минимальное испарение с поверхности аквариумов, на это указывают значения гигрометра, которые варьировались в диапазоне погрешности, установленной для данного вида оборудования. Влажность в течение всего времени экспериментов не превышала 70 %.

В табл. 5.13 приведены сведения о морфологических изменениях биомассы исследуемых растений и распределении трития в виде НТО и ОСТ. Представленные результаты показывают, что доля трития в виде ОСТ в биомассе растений составила 19–21 % от общего содержания трития, накопившегося в ходе экспериментов. При этом внешний вид и морфология практически всех растений были удовлетворительными и наблюдался заметный прирост биомассы (табл. 5.12).

По окончании эксперимента растения вынимали и высушивали в атмосфере азота (для предотвращения обмена с воздухом окружающей среды), затем их

измельчали, смешивали с другими пищевыми добавками, гранулировали и хранили в герметичной упаковке до полного употребления в пищу.

Таблица 5.13

Динамика морфологических параметров
биомассы растений и распределения трития по формам нахождения
[Bondareva, Schultz, 2015; Бондарева, 2020; Ракитский и др., 2020]

Морфологический параметр	Контроль, ч		Эксперимент, ч	
	0	336	0	336
Роголистник ($n = 10$)				
Длина, см / площадь, см ²	(5 ± 1)/0	(8 ± 2)/0	(5 ± 1)/0	(10 ± 1)/0
Масса (сырой вес), г	2,5 ± 0,6	5,7 ± 0,5	2,5 ± 0,6	8,4 ± 0,8
Содержание трития, Бк/кг сырого веса (%)				
НТО	1,0 ± 0,2 (100)	1,0 ± 0,3 (100)	1,0 ± 0,2 (100)	22 ± 1 (79)
ОВТ	< МДА	< МДА	< МДА	6 ± 1 (21)
Ряска ($n = 10$)				
	Контроль, ч		Эксперимент, ч	
	0	168	0	168
Длина, см / площадь, см ²	0/(0,10 ± 0,06)	0/(0,18 ± 0,07)	0/(0,11 ± 0,07)	0/(0,25 ± 0,05)
Масса (сырой вес), г	0,12 ± 0,05	0,17 ± 0,05	0,12 ± 0,06	0,21 ± 0,03
Содержание трития, Бк/кг сырого веса (%)				
НТО	0,9 ± 0,5 (100)	0,8 ± 0,6 (100)	0,9 ± 0,5 (100)	17 ± 1 (81)
ОВТ	< МДА	< МДА	< МДА	4 ± 1 (19)

Перед началом третьего этапа исследований караси были подвергнуты химическим исследованиям, результаты которых представлены в табл. 5.14.

Таблица 5.14

Результаты исходных образцов рыб ($n = 70$)
[Бондарева, 2020; Ракитский и др., 2020]

Радионуклид ³ H		Содержание < МДА			
мг/кг сырого веса					
Элемент	Содержание	Элемент	Содержание	Элемент	Содержание
Na	73±3	Mn	2±1	Cu	0,8±0,2
K	54±4	P	14±2	Cl	10±1
C	46± 5	S	15±3	Ca	14±1
Fe	11±2	Si	27±4	Mg	7±2

В табл. 5.15 приведены сведения об изменении морфологических параметров исследуемых рыб при проведении третьей стадии исследований. Из представленных результатов можно заметить, что рыбы развивались достаточно хорошо, что видно из увеличения массы и длины особей.

В связи с тем, что условия содержания рыб были более благоприятными (достаточное количество пищи, оптимальный режим освещения и температуры, циркуляция воды в аквариумах), по сравнению с естественными, наблюдался достаточно быстрый набор веса [Сабанеев, 1994; Привезенцев, Власов, 2004]. Основными компонентами мышечной массы были ($n = 10$): белки — 16 ± 1 %, вода — 70 ± 2 %, жиры — 13 ± 1 %, зола — примерно 1 %.

В табл. 5.16 представлены сведения о динамике распределения трития в органах рыб, суммарном содержании трития и коэффициентах накопления трития всей рыбой.

Таблица 5.15

Изменение морфологических параметров исследуемых особей карася ($n = 10$) [Бондарева, 2020; Ракитский и др., 2020]

Параметр	Исходные	250-е сутки	550-е сутки
Масса, г	120 ± 17	500 ± 55	800 ± 110
Длина, см	17 ± 3	35 ± 5	60 ± 6

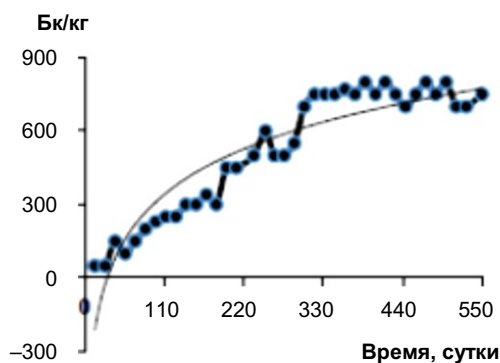


Рис. 5.9. Динамика изменения содержания трития в осадках аквариума (растительные остатки, фекалии рыб, остатки корма)

В ходе проведённых экспериментов было выявлено, что мышечная ткань накапливает большую долю поглощённого всей рыбой трития (до 56 %), при этом доля накопленного трития не зависит от корма, который употреблялся рыбой. С печенью связалось около 35 % от всего накопленного рыбой трития в обеих системах.

На рис. 5.9 приведены данные о динамике содержания трития в компонентах, отобранных со дна аквариумов [Бондарева, 2020; Ракитский и др., 2020]. Обнаружено, что часть радионуклида выносится в водную систему в виде различных остатков, что в том числе является одним из факторов изменения содержания трития в воде.

Известно, что потребление рыбной продукции возрастает во всём мире. Количество и качество этого продукта зависит от вида рыбы и от природы её происхождения (выращивание в естественных или искусственных условиях).

В количественном соотношении содержание мышечной ткани каждой особи варьируется в пределах 40–50 % от общей массы рыбы [Бондарева, 2020; Ракитский и др., 2020], следовательно, при потреблении рыбы человеком основной дозообразующей частью является, главным образом, мышечная ткань. В соответствии с этим были проведены исследования по связыванию трития именно с этой частью рыб, с попыткой выделения белков и липидов и последующей оценкой доли радионуклида, связанного с этими компонентами (табл. 5.17).

Таблица 5.16

Динамика распределения общего трития по органам особей карася (% от накопления)
[Бондарева, 2020; Ракитский и др., 2020]

Орган	Контрольные системы			Модельные системы, %					
	С роголистником / ряской			С роголистником			С ряской		
	0 час	250-е сутки	550-е сутки	0 час	250-е сутки	550-е сутки	0 час	250-е сутки	550-е сутки
Жабры	<МДА	<МДА	<МДА	<МДА	1,0 ± 0,1	1,4 ± 0,6	<МДА	1,1 ± 0,2	1,7 ± 0,3
Кости + голова	<МДА	<МДА	<МДА	<МДА	<МДА	<МДА	<МДА	<МДА	<МДА
Кожа + плавники + чешуя	<МДА	<МДА	<МДА	<МДА	2,0 ± 0,4	1,6 ± 0,8	<МДА	1,9 ± 0,3	1,3 ± 0,5
Печень	<МДА	<МДА	<МДА	<МДА	30 ± 4	34 ± 3	<МДА	31 ± 4	36 ± 3
Кишечник с содержимым	<МДА	<МДА	<МДА	<МДА	8,0 ± 0,6	3 ± 1	<МДА	5 ± 1	2 ± 2
Желудок с содержимым	<МДА	<МДА	<МДА	<МДА	9 ± 1	10 ± 1	<МДА	9 ± 1	10 ± 1
Мышечная ткань	<МДА	<МДА	<МДА	<МДА	44 ± 3	54 ± 5	<МДА	46 ± 4	56 ± 2
$\frac{(\text{Всего, \%}) \text{ кБк/кг}}{^3\text{Н в воде (Бк/л)}}$	$\frac{< \text{МДА}}{4 \pm 1}$	$\frac{< \text{МДА}}{4 \pm 1}$	$\frac{< \text{МДА}}{4 \pm 1}$	$\frac{< \text{МДА}}{4 \pm 1}$	$\frac{(100) \cdot 3,0 \pm 0,9}{(1,0 \pm 0,2) \cdot 10^3}$	$\frac{(100) \cdot 7,8 \pm 1,1}{(4,0 \pm 0,3) \cdot 10^3}$	$\frac{< \text{МДА}}{4 \pm 1}$	$\frac{(100) \cdot 2,8 \pm 0,5}{(1,0 \pm 0,2) \cdot 10^3}$	$\frac{(100) \cdot 8,4 \pm 0,9}{(4,0 \pm 0,2) \cdot 10^3}$
Коэффициент накопления K_c , л/кг					3,0 ± 0,6	1,95 ± 0,28		2,8 ± 0,2	2,1 ± 0,2

Таблица 5.17

Количество липидов и белков в мышечной массе исследуемых карасей и определение содержания трития в них ($n = 3$) на сырую массу [Бондарева, 2020; Ракитский и др., 2020]

Контроль		Эксперимент			
Содержание, г 550-е сутки		Содержание трития, Бк/г			
		250-е сутки		550-е сутки	
Белки	Липиды	Белки	Липиды	Белки	Липиды
С роголистником					
128 ± 8	104 ± 6	47 ± 4	39 ± 5	112 ± 9	101 ± 6
С ряской					
138 ± 11	105 ± 7	40 ± 3	33 ± 7	125 ± 8	98 ± 5

Полученные результаты показали, что динамика связывания трития с белками и липидами практически не зависит от корма и прямо пропорциональна времени проведения эксперимента. Отсюда было сделано заключение о том, что оба эти растения одинаково переваривались в органах пищеварения рыб, которых кормили насильственно гранулами, содержащими растения с тритием.

Известно, что атом трития при распаде излучает β -частицу, кроме того, образуется ^3He , который отличается от атома водорода и химически, и физически. ^3He , образованный вместо включённого нуклида водорода, создаёт ситуацию, когда электрон-нейтральная биологическая макромолекула приобретает положительный заряд. Это приводит к увеличению её химической активности, последствия которой могут быть неконтролируемыми и чаще всего очень негативными. Примером такого процесса является трансмутационные генетические эффекты живых организмов.

В связи с вышесказанным были предприняты попытки оценить вклад фракций липидов, белков и их фракций [Park, Lanier, 2000] в связывание трития печенью (табл. 5.18). Разброс показателей в выделенных фракциях липидов и белка был незначимый. В связи с этим оценку вклада каждой из выделенной фракций на накопление трития печенью проводили по усреднённому показателю (табл. 5.19).

Таблица 5.18

Биохимические показатели печени у исследуемых особей карася ($n = 3$) [Ракитский и др., 2020]

№ п/п	Показатели	%	№ п/п	Показатели	%
	% от сырой массы ткани, (5 ± 1) г			% от сухой массы, (1,5 ± 0,2) г	
1	Общие липиды	16–18	4	Фосфолипиды	12–13
2	Белок	10–12	5	Холестерин	11–15
3	Вода	70	6	Триацилглицерины	25–27
			7	Эфиры холестерина	43–45

Представленные результаты свидетельствуют о том, что тритий накапливается в печени, преимущественно связываясь жировыми тканями, в состав которых входят липиды (~ 39 %). Чуть меньше трития связано с белками (~ 19 %), и меньше всего он находится в виде свободной воды (~ 3 % от всего содержания трития в печени).

Таблица 5.19

Определение содержания трития в составных частях печени рыб: общие липиды, общий белок в их фракциях и в воде, Бк/г (% к общему содержанию трития в печени) [Ракитский и др., 2020]

Биохимические показатели	Системы	
	с ряской	с роголистником
Сырая масса, Бк/г (%)		
вода	0,022 ± 0,003 (3)	0,022 ± 0,002 (3)
общие липиды	0,303 ± 0,007 (39)	0,294 ± 0,008 (39)
общие белки	0,146 ± 0,006 (19)	0,136 ± 0,007 (18)
Сухая масса, Бк/г (%)		
фосфолипиды	0,104 ± 0,009 (7,8)	0,106 ± 0,008 (7,5)
холестерин	0,398 ± 0,005 (30)	0,411 ± 0,008 (29)
триалглицерины	0,261 ± 0,015 (19,5)	0,286 ± 0,014 (20,7)
эфирь холестерина	0,274 ± 0,010 (20)	0,300 ± 0,011 (21)

Неучтённое содержание трития, накопленное печенью, связано с неидентифицированными веществами, входящими в состав печени.

Печень является самым крупным из паренхиматозных органов. Она выполняет ряд функций:

1. Принимает и распределяет вещества, которые поступили в организм из пищеварительного тракта и приносятся с кровью. Они проникают в гепатоциты, подвергаются химическим превращениям и в виде промежуточных или конечных метаболитов поступают в кровь и разносятся в другие органы и ткани.

2. Служит местом образования желчи.

3. Синтезирует вещества, которые используются в других тканях.

4. Инактивирует экзо- и эндогенные вещества, а также гормоны.

Такое разнообразие функций обусловлено особенностями строения печени и её отдельных клеток.

Печень имеет очень высокий уровень метаболической активности. В ней реэстерифицируются липиды пищи, откуда они разносятся кровью в другие ткани и жировые депо, а мобилизуемые из депо липиды вновь переносятся в печень — основное место их окисления и синтеза [Further study..., 1989; Hill, Johnson, 1993].

Был выявлен рост уровня трития в мышечной массе рыб, связанного с липидами, до 39 % от содержания трития всей рыбы (см. табл. 5.17), и большой вклад в накопление трития (~ 39 % от общего содержания трития в печени) липидов, входящих в состав печени (см. табл. 5.16).

Количество фосфолипидов в тканях по сравнению с другими фракциями в меньшей степени связано с физиологическим состоянием рыб, оно не зависит от особенностей питания. Так как условия содержания всех рыб были

одинаковыми, то и содержание фосфолипидов имеет наименьшую вариативность, что влияет и на долю связывания трития этой фракцией, максимум которой составил 7,9 %.

Использование холестерина в процессах биосинтеза и в регуляции мембран является причиной пристального внимания при оценке доли связывания трития. В проведённых экспериментах выявлен наибольший вклад в накопление трития именно холестерином (~ 30 %). С учётом эфиров холестерина доля связывания трития достигает 50 % (в пересчёте на сухую массу) от всего накопленного печенью трития.

В период интенсивного накопления веса липиды запасаются в депо в виде триацилглицеринов. В связи с тем, что рацион питания и режим содержания особей рыб не менялся в течение всего срока проведения эксперимента, то и содержание триацилглицеринов не уменьшалось, в отличие от такового у рыб в естественных условиях, а продолжало накапливаться. На это указывает общий прирост массы мышечной ткани рыб, особенно увеличение содержания липидов. Эта закономерность была перенесена и на исследуемый орган — печень. Следовательно, увеличение содержания трития в триацилглицеринах имеет прямую зависимость от содержания липидов в печени [Цитогенетическое обследование..., 2009]. Таким образом, накопление трития в печени происходит за счёт образования необменных органически связанных форм (более 50 % от всего количества накопленного трития печенью).

Увеличение доли необменного органически связанного трития как в печени, так и во всем организме в целом увеличивает радиотоксичность трития по сравнению и тритиевой водой (НТО).

Другим немаловажным параметром, изучению которого были посвящены настоящие исследования, является определение периода полувыведения трития из организма при употреблении в том числе и пищи, обогащённой тритием. Для этого по три образца рыб после 250 суток эксперимента по накоплению трития были помещены в чистую воду. В течение 300 суток рыб кормили чистым, не содержащим тритий кормом. По окончании эксперимента рыбы также были препарированы. В каждой части определяли содержание трития.

Согласно рекомендациям, приведенным в работе [Melintescu, Galeriu, 2011], рассчитаны периоды полувыведения трития из органов рыбы. Результаты экспериментов приведены в табл. 5.20.

Таблица 5.20

Периоды полувыведения трития из органов рыбы ($n = 3$) (Ракитский и др., 2020)

Орган рыбы	Системы с <i>Ceratophyllum/Lemna</i> , Бк/г	
	250 дней	550 дней
Жабры	0,03/0,033	< МДА
Кости+голова	< МДА	< МДА
Кожа + плавники + чешуя	0,06 ± 0,01/0,09 ± 0,03	< МДА
Печень	1,08 ± 0,09/ 0,98 ± 0,1	0,79 ± 0,16/0,72 ± 0,18
Желудок с содержимым	0,24 ± 0,06/0,18 ± 0,09	0,11 ± 0,03/0,10 ± 0,03
Кишечник с содержимым	0,27 ± 0,09/0,25 ± 0,08	0,12 ± 0,02/0,12 ± 0,07
Мышечная ткань	1,62 ± 0,21/1,57 ± 0,17	0,80 ± 0,14/0,78 ± 0,12

Выявлено, что убыть трития варьируется в пределах от 27 до 65 %, в зависимости от исследуемого органа. Средним показателем периода полувыведения для всей рыбы может использоваться значение 175 дней, тогда как для печени период полувыведения достигает 550 дней.

Таким образом, накопление трития в печени происходит за счёт образования необменных органически связанных форм (более 50 % от всего количества накопленного трития печенью).

Глава 3. Моделирование процессов воздействия трития на млекопитающих

3.1. Воздействие на млекопитающих, дозообразование

В результате накопления научных фактов о биологическом действии радионуклидов сформировался вывод о том, что биологическая опасность поступления радионуклидов в организм определяется величиной поглощённой дозы и её пространственно-временным распределением, а также мнение о том, что внутреннее облучение по сравнению с внешним отличается рядом особенностей биологического действия [Хайн, Браунелл, 1958; Бак, Александер, 1963; Активация системы..., 1989; Высоцкий, 2010]:

- облучение, особенно с учётом микрораспределения поглощённой дозы, характеризуется неравномерностью вследствие различий в органотропности радионуклидов, наиболее интенсивному облучению подвергаются органы их поступления и основного депонирования;

- облучение носит протяжённый характер, даже при однократном поступлении радионуклида облучение организма продолжается длительный период, иногда в течение всей жизни индивидуума с постоянной или постепенно падающей мощностью дозы, зависящей от величины эффективного периода полураспада;

- при инкорпорации радионуклидов всё время нахождения их в организме параллельно происходят процессы повреждения и восстановления, динамика процессов определяется количеством введённых радионуклидов и ритмом их поступления в организм.

Отдалённые последствия воздействия ионизирующей радиации в относительно малых дозах или дозах, вызывающих хроническое течение поражения, являются критерием для переноса экспериментальных данных с животных на человека [Genetic effects..., 1986; NCRP..., 1991]. Имеются сведения о том, что при инкорпорации радионуклидов с коротким эффективным периодом полураспада, к которым относится и тритий (в виде НТО), достаточно закономерным является малое различие между острыми, подострыми и хронически эффективными дозами. Кривые *доза-эффект* имеют пологий характер [Радиобиология инкорпорированных..., 2016].

Тритий является изотопом биогенного элемента водорода [Беловодский, 1985], при поступлении в организм относительно равномерно распределяется по всем органам и тканям. Обладая политропным воздействием на органы и ткани организма, он является значительно более токсичным радионуклидом, чем другие γ - и β -излучатели (^{137}Cs , ^{106}Ru), которые имеют примерно такой же характер распределения, так как в единице объёма ткани он создаёт в 10–30 раз большую

плотность ионизации, чем рентгеновское и γ -излучение. Кроме того, тритий обладает трансмутагенным действием, которое может вызывать генетические эффекты. По данным НКДАР ООН (1988 г.), тритий отнесён к числу семи наиболее опасных радионуклидов, таких как цезий-137, углерод-14, фосфор-32, радий-226, плутоний-239 и америций-241.

В организме человека тритий существует в виде двух отдельных соединений — окиси трития НТО и ОСТ. Наибольшую опасность представляет тритий в виде ОСТ, так как скорость его обмена в тканях характеризуется биологическим периодом полувыведения ($T_{1/2б}$) — временем, в течение которого выделяется половина поступившего в организм радиоактивного вещества, а период полувыведения трития в виде НТО из организма человека составляет около 10 дней, в то время как для второго соединения $T_{1/2б}$ составляет больше года и зависит от вида ОСТ. По активности 5 % ОСТ опаснее, чем 95 % НТО [Kinetics of dose..., 1971; Радиобиология инкорпорированных..., 2016].

На всасывание НТО через кожу существенно влияет время года, а также температура окружающей среды. Максимальное количество его активности наблюдалось в крови, печени и мышцах крыс в летние месяцы (июль, август), когда температура в виварии достигала 26,4–25,0 °С. Резорбция НТО через кожу составляла 5,4 % нанесённого количества. В опытах на крысах установлено, что при нанесении НТО на здоровую и повреждённую кожу хвоста в количестве $7,51 \cdot 10^4$ Бк на крысу и экспозиции от 30 мин до 12 часов изотоп быстро всасывается и равномерно распределяется по органам и тканям. Повреждение рогового слоя кожи крыс резко увеличивает всасывание НТО. Имеется прямая зависимость от степени повреждения рогового слоя и скорости всасывания НТО.

В работе [Журавлёв, 1964] по изучению всасывания НТО через кожу поросят и крыс приводятся данные по ПДУ загрязнения кожи. Авторы считают, что всасывание НТО через кожу в течение 6 часов составляет всего 0,023 %. Периоды полувыведения трития из кожи: T_1 — 2 часа, T_2 — 12 суток. С первым периодом выделяется 95 % трития, со вторым — 5 %. При нанесении на кожу НТО в количестве $3,7 \cdot 10^4$ Бк/см² доза на базальный слой составляла 0,012 Гр.

Всасывание НТО из кишечника происходит в большей части по кровеносным, а не лимфатическим сосудам. В других работах показано, что в лимфе обнаруживается всего 3 % всасываемого количества НТО, остальные 97 % находятся в различных тканях и крови. Значительное число исследований посвящено распределению трития в организме. Большинство авторов считают, что ³Н независимо от пути поступления в организм равномерно распределяется по органам и тканям [Kinetics of dose..., 1971; Радиобиология инкорпорированных..., 2016]. Имеются данные по распределению в органах крыс после четырёхчасового воздействия газообразного трития и НТО в концентрации $7,4 \cdot 10^6$ Бк/мл (табл. 5.21).

Средняя концентрация трития в организме крыс при воздействии газообразного трития составляла $2,22 \cdot 10^6$ Бк/мл, НТО — $4,7 \cdot 10^6$ Бк/мл. Из таблицы видно, что примерно одинаковые количества НТО содержатся в воде различных органов после облучения ³Н. Наиболее прочно задерживается в тканях связанный тритий после вдыхания животными ³Н. Это, по-видимому, обусловлено тем, что значительные количества трития поступают в органические компоненты тканей (за счёт гидрирования жиров) без предварительного превращения в НТО. Различные авторы, изучавшие обмен ³Н, показали, что лишь незначительная часть его окисляется в организме до НТО, ³Н и водород

растворяются в жидкостях организма приблизительно до 1,6 % и быстро выводятся из него [Журавлёв, 1964].

В. Ф. Журавлев с соавторами в экспериментах на крысах показал, что окисление ^3H в организме крыс составляет 0,5 %, скорость окисления ^3H у человека примерно в 50 раз ниже, чем у крыс. Это, возможно, обусловлено тем, что крысы, как и другие грызуны, имеют выраженную способность бактерий кишечника окислять ^3H до НТО [Журавлёв, 1966, 1968, 1990, 1991; Журавлёв, Калязина, 1974; Биологические эффекты..., 1976; Цапков, 1982; Беловодский, Гаева, 1985; Калистратова, 2004].

Таблица 5.21

Распределение трития в органах крыс
[Osanov et al., 1971; Радиобиология инкорпорированных..., 2016]

Орган/ткань	Активность воды тканей, 10^4 Бк/мл	Связанный тритий, % к средней концентрации*	
		^3H	НТО
Печень	69	4,4	2,7
Селезенка	49	4,2	–
Почка	62	2,7	1,0
Сердце	43	2,5	0,6
Мозг	63	2,2	0,5
Легкие	58	1,8	0,7
Мышцы	60	1,2	0,13
Тонкий кишечник	59	1,2	1,0
Желудок	70	1,1	1,2
Толстый кишечник	62	0,9	1,9

* Величина равна отношению связанного трития во влаге организма ($3,7 \cdot 10^4$ Бк/г) к его среднему начальному содержанию ($3,7 \cdot 10^4$ Бк/мл).

Анализ данных по распределению трития в организме показал, что в водной фазе различных органов и тканей изотоп распределен равномерно, а в сухом остатке органов и тканей содержится до 10 % введенного трития. В своей работе В. Ф. Журавлев с соавторами [Журавлёв, Калязина, 1974; Журавлёв и др., 1976] приводит данные по распределению НТО в организме крыс при ингаляционном поступлении. Животные вдыхали НТО в концентрации $(8,14-13,32) \cdot 10^4$ Бк/л в течение 2 часов. Содержание трития в органах показало, что максимальные количества изотопа наблюдаются через 6 часов. Больше всего трития содержалось в мышцах, скелете, коже, крови и печени (табл. 5.22), его концентрация в водной фазе различных органов и тканей была практически одинаковой, что свидетельствует о равномерном распределении в организме. В ранние сроки после ингаляции концентрация НТО в водной фазе в 10–15 раз превышает концентрацию его в сухом остатке, однако к 16-м суткам, благодаря быстрому выведению изотопа из водной фазы органов и тканей, в водной фазе и сухом остатке она оказывается одинаковой.

Тритий длительное время может содержаться в органах и тканях. Об этом свидетельствуют данные по его распределению в организме собак в отдалённые

сроки после введения. Животным однократно вводили НТО в дозе 0,29 и $0,55 \cdot 10^7$ Бк/г. Через 6–8 лет после введения изотопа собаки были забиты. Тритий определяли в водной фазе и сухом остатке различных органов. Наибольшее его количество обнаружено в водной фазе мышц, крови, селезенке, печени и коже, наименьшее — наблюдается в щитовидной железе и надпочечниках. Было показано, что накопление трития в структурных элементах органов и тканей в отдалённые сроки примерно в 10–100 раз больше, чем в водной фазе [Журавлёв, 1966, 1968, 1990].

Таблица 5.22

Содержание окиси трития в органах крыс (% введённого количества) после однократной ингаляции [Журавлёв, Калязина, 1974]

Орган	15 мин	1 час	6 часов	1 сут	2 сут
Легкое	0,86 ± 0,15	0,63 ± 0,21	1,28 ± 0,45	0,76 ± 0,19	0,67 ± 0,18
Печень	0,67 ± 0,56	2,86 ± 1,0	3,9 ± 1,37	3,37 ± 0,19	2,44 ± 0,65
Почки	0,72 ± 0,1	0,68 ± 0,18	0,76 ± 0,33	0,52 ± 0,017	0,57 ± 0,015
Кишечник	4,2 ± 2,0	4,6 ± 1,3	3,5 ± 1,3	2,8 ± 1,3	2,7 ± 0,59
Кожа	9,4 ± 0,51	8,6 ± 2,3	10,2 ± 2,5	6,3 ± 0,57	6,0 ± 1,6
Кость	6,7 ± 1,4	7,4 ± 1,14	9,5 ± 6,8	4,5 ± 0,35	4,7 ± 1,4
Селезенка	0,25 ± 0,16	0,32 ± 0,2	0,27 ± 0,14	0,18 ± 0,05	0,18 ± 0,05
Мозг	0,96 ± 0,24	0,95 ± 0,17	1,0 ± 0,17	0,15 ± 0,13	0,48 ± 0,19
Мышцы	34,3 ± 5,35	47,3 ± 14,5	63,1 ± 29,4	34,6 ± 7,8	30,2 ± 10,75
Кровь	7,7 ± 1,5	7,0 ± 1,18	16,25 ± 5,5	6,94 ± 0,36	7,3 ± 2,0
Орган	4 сут	16 сут	32 сут	64 сут	128 сут
Легкое	0,39 ± 0,03	0,03 ± 0,017	0,016 ± 0,0096	0,015 ± 0,012	0,011 ± 0,011
Печень	1,18 ± 0,22	0,09 ± 0,01	0,039 ± 0,009	0,029 ± 0,003	0,019 ± 0,020
Почки	0,49 ± 0,012	0,021 ± 0,0075	0,009 ± 0,009	0,009 ± 0,005	0,009 ± 0,004
Кишечник	1,23 ± 0,15	0,06 ± 0,02	0,032 ± 0,007	0,044 ± 0,014	0,45 ± 0,011
Кожа	5,6 ± 0,24	0,51 ± 0,27	0,36 ± 0,16	0,59 ± 0,4	0,51 ± 0,22
Кость	2,4 ± 0,85	0,56 ± 0,32	0,37 ± 0,18	0,39 ± 0,09	0,36 ± 0,05
Селезенка	0,06 ± 0,04	0,008 ± 0,002	0,008 ± 0,0015	0,007 ± 0,0025	0,007 ± 0,002
Мозг	0,39 ± 0,95	0,026 ± 0,017	0,032 ± 0,016	0,02 ± 0,005	0,021 ± 0,003
Мышцы	16,3 ± 1,8	1,8 ± 1,4	0,69 ± 0,44	0,69 ± 0,34	0,67 ± 0,30
Кровь	3,72 ± 0,86	0,17 ± 0,02	0,13 ± 0,11	0,13 ± 0,01	0,13 ± 0,01

Таким образом, в отдалённые сроки наблюдается несколько иная картина распределения трития — увеличение накопления его в структурных элементах органов и тканей. Суммарное содержание трития в органе в основном определяется накоплением его в сухом остатке. Различие в накоплении трития между водной фазой и структурными элементами объясняется разными периодами его полувыведения из водной фазы и сухого остатка. Так, период полувыведения НТО из водной фазы органов собак составляет 5–6 суток. Период полувыведения трития из структурных элементов органов и тканей человека может превышать 200 суток [Журавлёв, Калязина, 1974; Журавлёв и др., 1976]. Аналогичные результаты изучения распределения трития у крыс и мышей получены и при хроническом поступлении в организм в дозе 370 Бк на крысу. Наибольшие концентрации трития обнаружены в органических компонентах головного мозга, коже и мышцах.

На распределение трития в организме также влияет форма химического соединения. Так, при введении этанола ^3H в водной фазе организма крыс накапливается до 58 % трития, в сухом остатке — 5–6 %. При поступлении в организм диоксифенилаланина — ^3H наибольшие количества трития накапливаются в структурных элементах органов и тканей (85,4 %), в водной фазе содержится 14,4 %. Эти данные свидетельствуют о том, что химическая форма трития может существенно влиять на кинетику обмена изотопа в организме.

При введении крысам ^3H -холестерина в структурных элементах органов к четвёртым суткам обнаруживается до 47,2 % трития, при этом на долю медленно выводимой фракции приходится в 20 раз больше накопленного трития, чем при введении НТО. Различия в кинетике обмена ^3H -холестерина и НТО приводят к кумуляции различных тканевых доз. Тканевая доза от ^3H -холестерина в 2,2 раза превышает таковую от НТО. Аналогичные изменения в накоплении трития отмечаются при введении ^3H -тирозина. В структурных элементах органов он накапливается до 50 %, а НТО — 8–10 %.

В организме ^3H распределяется преимущественно равномерно, как молекула H_2O , претерпевшая разведение в свободной воде организма, однако часть ^3H переходит в биологические макромолекулы вследствие реакции обмена $^3\text{H}-^3\text{H}_2$, являющегося обратимым процессом с направленностью от H к ^3H из-за различий энергии связи между $\text{H}-\text{C}$ и $^3\text{H}-\text{C}$.

Тритий, включившийся в макромолекулы, в процессе повторного обмена участвует слабо, что приводит к гетерогенному распределению ^3H в макромолекулах. При экстракции макромолекул актомиозина и коллагена из скелетных мышц наблюдается двухкомпонентная кинетика распределения ^3H из введённой ^3HNO .

Рыхлосвязанный ^3H исчезал в актомиозине после 17 суток, в коллагене — после 21 суток. Эффективное время для прочносвязанного ^3H в актомиозине составило 70 суток, в коллагене — 10^4 суток.

Приведённые выше исследования по изучению кинетики обмена и распределения характеризовали в основном поведение подвижного трития, находящегося в водной фазе организма. Однако в организме существует фракция органически связанного трития, обмен которого резко отличается от обмена трития, включённого в воду. Органически связанный тритий имеет исключительно важное значение при оценке отдалённых эффектов поражения и решении вопросов санитарно-гигиенического нормирования различных соединений трития.

Результаты собственных исследований и литературные данные свидетельствуют о том, что после однократного поступления оксида трития в организм значительные количества трития накапливаются в водной фазе организма, 8–10 % трития поступает в водородсодержащие структуры органов и тканей [Биологические эффекты..., 1976; Калистратова, 2004].

Тритий, включённый в структурные элементы тканей, выводится гораздо медленнее, чем из водной фазы: T_1 — 8 суток (3 %); T_2 — 124 суток (0,6 %). Из-за медленного выведения концентрация трития в сухом остатке органов и тканей в поздние сроки значительно превышает концентрацию трития в водной фазе [Kinetics of dose..., 1971].

Содержание органически связанного трития может существенным образом изменяться в отдалённые сроки после однократного поступления в организм, его накопление зависит от формы вводимого соединения и ритма поступления в организм. Так, через 7 и 8 лет после однократного введения окиси трития

собакам в дозе от $0,29$ до $0,55 \cdot 10^7$ Бк/кг содержание ОСТ в структурных элементах органов и тканей было в 15–20 раз больше, чем в водной фазе организма. Наибольшие количества связанного трития отмечались в сухом остатке мышц, коже, головном мозге и ткани легких [Журавлёв и др., 1976].

При хроническом поступлении окиси трития в организм тритий внедряется в структурные элементы органов в значительно большем количестве, чем при однократном воздействии. Локальная поглощенная доза, полученная 1 г сухого остатка печени за 59 суток хронического введения оксида трития кроликам, создается на 82,5 % за счет трития белковой части органа, на 11,5 % за счет свободных липидов и на 6 % за счет трития, включившегося в связанные липиды печени. Интенсивность включения изотопа в биохимические фракции сильно варьирует в зависимости от места их локализации в организме. Скорость включения трития в свободные липиды костного мозга в 3,76 раза ниже, чем в ту же фракцию печени [Evans, 1969; Источники и эффекты..., 2002].

При хроническом поступлении окиси трития в организм крыс в дозе $10,3 \cdot 10^4$ Бк накопление трития в сухом остатке в 9 раз больше, чем в водной фазе. Основной период полувыведения трития из водной фазы составляет 3,8 суток, а для сухого остатка — от 9 до 50 суток. В мягкие ткани тритий включается интенсивнее, чем в костную ткань. Выведение трития из печени идёт быстрее, чем из других мягких тканей. После прекращения поступления окиси трития в организм 38 % тканевой дозы создаётся за счёт включённого в структурные элементы органов трития.

По данным В. Ф. Журавлева и Н. С. Калязиной [1974], через четыре месяца ежедневного введения крысам окиси трития в дозе 0,016 Гр/сут содержание трития в структурных элементах печени было в 20 раз больше, чем в водной фазе. Для мышц отношение количества трития в сухом остатке к воде за весь период исследования (4 месяца) после окончания введения практически постоянно и равняется трём; это отношение для кожи после прекращения введения изменяется от 2,5 до 7. Количество трития, внедряемого в белки в первые сроки после окончания введения изотопа (до 14 сут), ниже концентрации трития в анализируемых органах и тканях. Однако через месяц его концентрация в белках в 3 раза превышает концентрацию в органах, через четыре месяца трития в белках содержится в 15 раз больше.

А. Г. Эванс [Evans, 1969] в своей статье приводит данные по содержанию трития в структурных элементах органов и тканей оленей, находящихся в естественных условиях на загрязнённой территории, при хроническом поступлении трития в организм. Анализировалось семь органов и тканей: сердце, печень, почки, селезёнка, кость, мышцы, жир. Хроническое воздействие трития окружающей среды является причиной включения его в органические молекулы органов и тканей, при этом органические включения в органы и ткани возрастают с течением времени. Исследования показали, что тритий в воде организма оленей составлял от 0,15 до 2,01 Бк. Инкорпорация трития в органические компоненты оленьих тканей была в 1,4–1,5 раза выше, чем его содержание в воде организма. Вероятно, больший коэффициент внедрения трития в органические молекулы, по сравнению с водой организма, лежит между 0,85–1,0.

Изучалось инкорпорирование органически связанного с пищей трития в некоторые органы крыс. Ежедневно в течение 5 суток крысы получали пищу, содержащую органически связанный тритий или тритиевую воду по $12,58 \cdot 10^4$ Бк/сут.

Общее выведение трития в течение 5 суток у крыс, получавших ОСТ, было на треть меньше, чем у крыс, получавших тритиевую воду, при этом у первых моча содержала только 30 % выводимого трития, у вторых — весь выводимый тритий. Концентрация трития в сухих тканях после введения ОСТ была значительно выше, чем после введения тритиевой воды, и это превышение колебалось от 17 (для тонкого кишечника) до 2,75-кратного (для головного мозга). Содержание трития в тканевых жидкостях при поступлении его в виде органически связанного и тритиевой воды существенно не различалось.

Кроме того, имеется информация о значительном инкорпорировании трития в органически связанной форме. Так, у лактирующей коровы, забитой через 23 дня после введения с питьевой водой окиси трития в количестве $925 \cdot 10^7$ Бк, наибольшее количество трития обнаружено в сухом остатке печени, несколько меньше — в селезёнке, яичниках и почках; в тканях кишечника и глаз — в 2–3 раза меньше, чем в печени. Во второй серии опытов трём бычкам ежедневно давали с водой по $3,7 \cdot 10^7$ Бк окиси трития в течение 25, 33 и 40 суток соответственно, трём другим вводили в аналогичных условиях порошок молока, полученного от коровы, которую поили тритиевой водой. В первом варианте содержание трития, включавшегося в органические компоненты тканей, не превышало 2,8 %, тогда как при введении трития с сухим молоком количество трития, включённого в органические структуры, увеличивалось в 15 раз. В третьей серии телёнок, мать которого в течение 40 суток беременности ежедневно получала с водой по $40,7 \cdot 10^7$ Бк окиси трития, 3,5 месяца после рождения вскармливался материнским молоком. В этом опыте количество трития в сухом остатке печени в 40 раз превышало таковое в случае поглощения тритированной воды, в 25 раз — в случае поглощения с сухим молоком.

Беременных коз поили водой, содержащей $172 \cdot 10^4$ Бк/л окиси трития. У трёх родившихся козлят исследовали содержание трития сразу после рождения, через один и два месяца. Во всех случаях обнаружено значительное включение трития в сухой остаток органов и тканей, по сравнению с водной фазой, его содержание было в 3 раза выше. При исследовании ткани печени, яичек, тимуса нашли, что тритий не включается в ДНК, радиоактивность сосредоточена в белковой фракции. Однако эти данные авторов не согласуются с целым рядом исследований о включении трития в ДНК.

Так, при введении мышам с питьевой водой трития в количестве 3,7 или $111 \cdot 10^4$ Бк/мл в течение всей жизни (в период внутриутробного развития изотоп вводили матери) его обнаружили в четырёх компонентах хроматина (гистоне, ДНК, РНК и белковом остатке), геме- и глобине гемоглобина и гликогене печени.

Имеются данные об уровнях отложения органически связанного трития при поступлении в организм тритиевой воды и загрязнённой травы. По данным Е. В. Антоновой с соавторами, при употреблении питьевой воды, содержащей окись трития, сухой остаток молока составил 0,037 %; в случае поступления трития с травой коэффициент внедрения был в 10 раз выше (0,37 %). Инкорпорация в органические структуры при употреблении молока от коровы, получавшей окись трития, составила 3 %, в случае употребления молока от коровы, получавшей загрязнённое сено, внедрение трития составляло 16 % всего инкорпорированного в организме [Тритий от молекулы..., 2022].

Также подчёркивается включение трития в органические компоненты молока [Москалев, 1989]. Коровы однократно и многократно получали окись трития. Тритий определяли в воде, белках и твёрдых фракциях молока. Период полувыведения трития из молока и мочи составлял 5 суток. Органические фракции молока после однократного поступления содержали 5 %, после многократного воздействия — 10 % трития. Это свидетельствует о том, что при хроническом поступлении изотопа в организм создаются условия, когда значительно большая доля трития внедряется в структурные элементы органов по сравнению с содержанием его в водной фазе. Поэтому при длительном поступлении трития в организм большой вклад в тканевую дозу обеспечивается органически связанным тритием органов и тканей.

Мыши с питьевой водой получали тритий в течение 40–147 суток. Удельная активность воды составляла 3,47 мБк/мл. Кенгуровым крысам проводилась инъекция тритиевой воды по 3,7 мБк/г массы периодически с 12–21-дневными интервалами в течение 90 дней. Представлено соотношение удельной активности трития в органически связанном водороде и водороде воды. Для печени, слизистой кишечника и семенников мышей это отношение было равно 0,252, 0,278 и 0,448 соответственно, для печени и слизистой кишечника крыс — 0,255 и 0,131 соответственно. Доза, полученная мягкими тканями организма, составила более 20 Гр за 90 суток. Относительная удельная активность печёночной ДНК составила 0,12, при этом все четыре основания ДНК (цитозин, тимин, аденин и гуанин) содержали тритий [Kinetics of dose..., 1971].

Большое значение при оценке биологического действия органически связанного трития имеет не только накопление его в организме, но и период полувыведения. Биологический период полувыведения трития из организма при хроническом воздействии изучали на пустынных грызунах. Он был определён в воде организма, мозге, печени, лёгких, почках, сердце и мышечной ткани у двух групп кенгуровых крыс, находящихся вблизи реактора, выделяющего тритий. Животные получали тритий с натуральной пищей в течение всей жизни. Результаты исследований показали, что биологический период полувыведения трития из тканей крыс в 1,5–4 раза больше, чем из воды организма. В сухом остатке тканей трития задерживается в 1,2–1,6 раза больше, чем в воде организма [Kinetics of dose..., 1971].

Также исследовалось поведение трития в организме крыс в течение 100 дней после потребления внутрь тритиевой воды, ^3H -лейцина и ^3H -глюкозы. Показано, что скорость выделения ^3H из тканей и его способность включаться в другие молекулы зависит от химической формы, в которой тритий введён в организм.

Сравнивалось распределение трития в печени, почках, семенниках, селезёнке, лёгких, сердце, тонкой кишке, мышцах и головном мозге крыс-самцов, получавших тритиевую воду или пшеницу, загрязнённую тритием. В случае однократного приёма пшеницы концентрации органически связанного трития в тканях крыс были в 20–30 раз выше, чем при однократном приёме тритиевой воды. В случае длительного приёма (в течение 22 суток) пшеницы, загрязнённой тритием, тканевые концентрации ОСТ были в 6–11 раз выше, чем при однократном приёме тритиевой воды. Как при остром, так и при хроническом приёме пшеницы, наиболее высокая концентрация органически связанного трития наблюдалась в печени, наиболее низкая — в мышцах и головном мозге. Тканевое

распределение ОСТ в случае приёма другой пищи, загрязненной тритием, в основном было таким же, как при употреблении пшеницы.

Изучали обмен и распределение органически связанного трития у крыс. Крысы линии Вистар постоянно получали тритированную пищу (48,1 кБк на крысу) или тритированную воду (37,0 кБк/мл), начиная с трёх недель до спаривания, кончая рождением третьего поколения. Накопление трития в тканях крыс, питавшихся тритированной пищей, в 3,53–0,38 раза выше, чем в тканях крыс, получавших тритированную воду. Наиболее высокие концентрации ОСТ были обнаружены в яичниках и лёгких — при поступлении с тритированной пищей и в семенниках и лёгких — при поступлении с тритированной водой [Kinetics of dose..., 1971; Радиобиология инкорпорированных..., 2016].

При поступлении трития с пищей в течение 64 суток беременности и лактации достигаются равновесные уровни органически связанного трития в тканях, а при поступлении с водой не достигаются. Расчёты мощности дозы в тканях на основе содержания трития в водной фазе организма ведут к недооценке поглощенной дозы в тканях крыс, особенно при поступлении с тритированной пищей.

Изучали распределение и выведение трития у крыс, которым интратрахеально вводили тритированные осколки стекла. Показано, что частицы откладывались преимущественно в легочной области и удалялись медленно с $T_{1/2}$ — 150 ± 30 суток. Вычисленная доза в лёгких при интратрахеальном введении тритированных осколков стекла была на три порядка больше, чем в организме, и приблизительно в 40 раз больше, чем доза в лёгких в случае ингаляции подобного количества НТО. Отмечается, что выведение трития с мочой напоминает картину выведения НТО с мочой [Kinetics of dose..., 1971; Радиобиология инкорпорированных..., 2016].

Изучался также переход ^3H в органические компоненты и водную фракцию молока жвачных животных. Выбор молока для исследований определялся рядом факторов, в частности, тем, что в молоке происходит синтез протеина (казеин), жиров и углеводов (лактоза); эти процессы, возможно, аналогичны процессам, происходящим в других тканях организма.

Тритий вводился животным в виде органически связанного и ^3H . От суточного поступления ОСТ в молоко переходит около 1,6 % ^3H , причём в водную фракцию 0,84 %, в органическую — 0,74 %. В жир переходит 0,53 %, в казеин — около 0,18 %, в лактозу — 0,04 %. С увеличением введения ОСТ коэффициент перехода ^3H в молоко уменьшается. При одновременном равном введении ^3H и ОСТ в организм животных из перешедшего в жир молока ^3H 2,4 % обусловлено ^3H и 97,6 % ОСТ, в казеине — 3,2 и 96,8 %, в лактозе — 39,4 и 60,6 % соответственно. Выведение ^3H из молока описывается трехкомпонентной моделью с периодами полувыведения 1,7, 5,1 и 68 суток [Kinetics of dose..., 1971; Радиобиология инкорпорированных..., 2016].

Имеется информация о содержании свободного трития в водной фазе и органически связанного в почве, растениях, пищевых продуктах, тканях человека и животных за 1970–1978 гг. [Жебентяев, 2015; Тритий от молекулы..., 2022]. Показано, что удельная активность органически связанного трития выше, чем свободного. Соотношение связанного и свободного трития в почве, растениях, тканях животных и человека составляет 6–8, 3–4, 1,5–2 соответственно.

Выбор в качестве критического органа водной фазы организма является консервативным, так как нет такой ткани, содержание водорода в которой было бы более высоким. Рекомендованные предельные уровни содержания трития

в питьевой воде, воздухе и пище также являются консервативными. Исследователи [Храмченкова, 2003, Сыса и др., 2017] отмечают, что при остром воздействии трития основной трудностью является оценка эквивалентной дозы за счёт трития, связанного в тканевых компонентах. Наивысшим пределом для связанного трития принята величина в 25 % эквивалентной дозы, создаваемой содержанием трития в водной фазе организма.

Ранее Р. Кирхман с коллегами [Kirchmann et al., 1971], чуть позднее В. С. Калистратова с соавторами [Радиобиология инкорпорированных..., 2016] приводят данные о зависимости биологического эффекта от общей концентрации его в клетках и от химической формы находящегося в них трития.

Таким образом, накопление в организме органически связанного трития зависит от сроков воздействия, формы вводимого соединения, ритма поступления в организм и физических факторов воздействия. Содержание ОСТ в органах и тканях может составлять до 25 % по отношению к тритиевой воде.

Рекомендации Международной комиссии по радиационной защите по допустимому содержанию трития в организме человека относятся к тритиевой воде. Они основаны на периоде полувыведения для человека в 10–12 суток. При обоснования допустимой концентрации накопление ОСТ в организме человека не учитывалось, не определялся также вклад связанного трития в общую дозу облучения организма. Расчёты поглощённой дозы, основанные только на содержании трития в водной среде организма, приводят к занижению истинных значений. Поскольку содержание органически связанного трития относительно его содержания в водной фазе будет увеличиваться, можно поставить вопрос о правомерности рекомендуемой допустимой концентрации трития в организме человека.

Если учесть, что накопление ОСТ в организме может достигать 25 % по отношению к тритиевой воде, то допустимое содержание трития в организме человека должно быть уменьшено с 44,4 до 33,3 МБк. В соответствии с этим должны быть снижены и допустимые концентрации трития в воздухе производственных помещений, атмосферном воздухе и воде открытых водоёмов.

Проблема накопления, поведения и выделения органически связанного трития требует к себе пристального внимания и изучения. Дальнейшее накопление материалов экспериментальных исследований по кинетике обмена, распределению и биологическому действию органически связанного трития позволит более обоснованно решать вопросы нормирования трития.

На скорость включения трития в организм и характер его распределения может существенно влиять внешнее γ -излучение. С увеличением дозы внешнего γ -облучения ^{60}Co замедляется включение трития в органические структуры, наблюдается более медленное выведение трития и продуктов распада из организма. С увеличением дозы скорость включения трития из воды в белки падает, а скорость его перехода из белков в жиры и из жиров в воду возрастает. Выведение трития из организма замедляется и с увеличением возраста животных, например, чем старше становилось животное (крыса) — от 35 до 1000 суток, тем более длительным становился период полувыведения — с 1,5 до 4,5 суток.

Принципиальная возможность включения из НТО в ДНК тканей следует из анализа метаболических путей водорода в организме. Малый пробег β -частиц, испускающихся при распаде ядра трития, относительно размера ядер соматических клеток, а также ведущая роль повреждения ДНК (как основной мишени действия

радиации на клетку) позволяет предполагать следующее. Тритий, включенный в генетический материал, является более токсичным, чем равномерно распределенный в водной среде.

Условия эксперимента:

1) однократное введение оксида трития в количестве 22 МБк/г массы тела (1-я группа животных) и соответствующая по формированию доза внешнего γ -облучения (2-я группа) создавали практически однотипные суточные и суммарные дозы;

2) суммарная доза на организм в эксперименте: воздействие оксида трития — $7,9 \pm 0,4$ Гр; воздействие γ -квантов — $8,0 \pm 0,5$ Гр.

В первой группе первый случай гибели крысы зафиксирован через три месяца после воздействия, во второй — через пять месяцев. Гибель 50 % крыс была зафиксирована через девять месяцев в первой группе, во второй — через одиннадцать. Продолжительность жизни крыс 1-й и 2-й групп, сравнению с контрольной, была сокращена на 38 и 14 %.

Экспериментальными исследованиями на лабораторных мышах было установлено, что воздействие НТО при однократном или длительном его введении приводит к большему структурному и функциональному поражению генетического аппарата клеток тканей животных, чем действие адекватного по формированию мощности дозы γ -излучения (табл. 5.23).

Таблица 5.23

Распределение трития в органах крыс по окончании эксперимента

Орган или ткань	Активность воды тканей, $\times 10^4$ Бк/мл	Связанный тритий, % к средней концентрации*	
		^3H	НТО
Печень	69	4,4	2,7
Селезенка	49	4,2	—
Почка	62	2,7	1,0
Сердце	43	2,5	0,6
Мозг	63	2,2	0,5
Легкие	58	1,8	0,7
Мышцы	60	1,2	0,13
Тонкий кишечник	59	1,2	1,0
Желудок	70	1,1	1,2
Толстый кишечник	62	0,9	1,9

* Величина равна отношению связанного трития во влаге организма ($3,7 \cdot 10^4$ Бк/г) к его среднему начальному содержанию ($3,7 \cdot 10^4$ Бк/мл).

Интегральные показатели изменения структуры ДНК двух групп животных в отдельные периоды исследования приведены в табл. 5.24.

На скорость включения трития в организм и характер его распределения может существенно влиять внешнее γ -излучение.

Согласно нашим данным, с увеличением дозы внешнего γ -облучения ^{137}Cs (с 1 до 35 Зв/ч) замедляется включение трития в органические структуры (с 21

до 15 % от общего количества трития), наблюдается более медленное выведение трития и продуктов распада из организма ($T_{1/2}$ — приблизительно с 85 до 135 сут).

С увеличением дозы скорость включения трития из воды в белки падает, а скорость его перехода из белков в жиры и из жиров в воду возрастает.

Таблица 5.24

Интегральные показатели изменения структуры ДНК тимоцитов крыс при однократном введении НТО и действии адекватного внешнего γ -облучения в период формирования радиационной дозы (0–30 сут) и после него (30–270 сут), % по отношению к возрастному контролю

Показатель	Группа животных	Исследуемый период, сут	
		0–30	30–270
мтДНК	1 (НТО)	66 ± 3	87 ± 2
	2 (γ)	83 ± 4	91 ± 2
ПДН	1 (НТО)	363 ± 31	148 ± 13
	2 (γ)	186 ± 13	114 ± 8
Активность ДНКазы П на 1 мг ДНК	1 (НТО)	350 ± 23	113 ± 23
	2 (γ)	162 ± 12	104 ± 10
ОР после тест-облучения в дозе 20 Гр	1 (НТО)	70 ± 1	199 ± 5
	2 (γ)	89 ± 4	98 ± 2
Репарирование ОР ДНК после тест-облучения	1 (НТО)	26 ± 1	211 ± 3
	2 (γ)	42 ± 1	106 ± 2
Объём лизиса	1 (НТО)	82 ± 1	92 ± 2
	2 (γ)	48 ± 1	90 ± 1

Сравнительное изучение действия трития с внешним γ -излучением во времени (время-эффект) позволяет сопоставить различия в характере повреждения и восстановления на разных уровнях биологической организации при этих дозах излучения. Такие данные необходимы для понимания основных механизмов, определяющих большее повреждающее действие трития по сравнению с γ -излучением. Чтобы получить эти данные, животных сравнимой группы облучали на γ -установке ^{137}Cs с падающей мощностью дозы, имитирующей воздействие НТО.

Проводились исследования по выведению, распределению и удерживанию трития в тканях крыс в зависимости от их возраста. Возраст крыс составлял от 3 до 300 суток. Тритиевую воду вводили в желудок. Концентрацию трития определяли в моче, исследовали также включение ^3H в водную фракцию и органический компонент тканей различных органов (кровь, мозг, печень, мышцы, семенники). Показано, что чем старше животное, тем период полувыведения ^3H больше. Наблюдается корреляция между возрастом и скоростью обмена трития в водной фазе и органическом компоненте тканей. В течение первых суток после введения ^3H концентрация трития в водной фазе снижается. В случае органического компонента уменьшение концентрации трития происходит медленнее. Данная тенденция ярче выражена у молодых животных.

Большой практический интерес представляют исследования по распределению трития в организме людей. В организм работающих в производственных условиях в течение 8 месяцев поступал тритий в виде НТО. Содержание трития в жидкостях тела в течение этого срока колебалось от 22,2 до $74 \cdot 10^4$ Бк/л. Удельная активность в органических компонентах организма (жир и кожа) при биопсии была выше, чем в воде тела. Жир содержал 20, а кожа 71 % воды, содержание водорода в указанных органических компонентах составляло 11,4 и 7,6 % соответственно. Тканевая доза, создаваемая инкорпорацией трития в органические компоненты кожи и жира, составляла всего 1–2 %, а в головном мозге — 3–5 % дозы, создаваемой тритием в воде тела и аккумулярованной за время воздействия.

Установлено, что после приёма внутрь, вдыхания или всасывания через кожу НТО поступает в кровь полностью в пределах времени от нескольких секунд до десятков минут [Pinson, Langham, 1957; Balonov et al., 1974; Балонов, 1983]. После попадания в кровь НТО разносится кровеносной системой во все органы и ткани тела, мгновенно проникает через стенки сосудов во внеклеточную жидкость и из неё в клетки тканей и таким образом равномерно растворяется в воде тела. Этот процесс занимает от нескольких десятков минут до нескольких часов [Балонов, Чипига, 2016].

Небольшая часть трития из состава НТО (0,5–4 %) очень быстро обменивается с водородом органических молекул, связанным в группах ОН, NH и SH в тканях организма, другая, также небольшая часть (от менее 1 до 3 % в организме человека), постепенно преобразуется в органически связанный тритий в результате биохимических процессов, то есть включается в устойчивые СН-связи в органических молекулах [Balonov et al., 1974; Hill, Johnson, 1993; Балонов, Чипига, 2016].

Из организма человека НТО выводится по экспоненциальному закону с мочой, потом, паром в выдыхаемом воздухе и др. Биологический период удержания НТО в теле человека изучали в нескольких исследованиях в общей сложности у примерно 400 взрослых путём измерения концентрации трития в моче. Х. Л. Батлер и Дж. Х. Лерой [Butler, Leroy, 1965], исследовавшие 310 случаев поступления НТО, выявили, что биологический период для НТО варьировался от 4 до 18 суток (в среднем 9,5). Другие исследования, основанные на меньшем числе случаев [Hill, Johnson, 1993], показали аналогичные результаты: от 6 суток — для 8 случаев [Rudran, 1988] до 12 суток — в 5 случаях [Балонов, 1983].

Этот параметр изменяется с потреблением воды, температурным режимом и возрастом. Ряд исследований показал существование второго экспоненциального компонента динамики выведения трития с мочой человека с периодом 23–226 суток, предположительно связанного с формированием ОСТ из НТО и последующей деградацией ОСТ [Sanders, Reinig, 1968; Urinari excretion..., 1968; Minder, 1969; Lambert et al., 1971; Henry, 1972; Moghissi et al., 1972; Балонов, 1983; Trivedi et al., 1997].

В немногих исследованиях обнаружен третий, еще более длительный компонент выведения трития из организма с мочой [Эйдис и др., 1964; Moghissi et al., 1972; Trivedi et al., 1997]. Однако его параметры, полученные лишь на небольшой группе — пять человек, большинство из которых подвергалось длительному воздействию НТО или тритиевого светосостава, весьма неопределенны. Только в работе [Trivedi et al., 1997] получены определённые

параметры этого компонента на одном исследуемом, и этот компонент может добавить пренебрежимо малый вклад в дозу, так как составляет менее 1 % от общего количества ОСТ.

У млекопитающих при хроническом потреблении ^3H достигается равновесие его с обменным водородом, причем удельная активность тканей достигает 35 % общей воды тела. Механизм концентрирования ^3H неизвестен, в случае прекращения его поступления активность тканей снижается медленнее, чем активность воды тела, поэтому в новых равновесных условиях активность тканей превышает таковую воды. У человека при остром поступлении выведение ^3H описывается экспоненциальной моделью с $T_{\text{биол}}$, равным 12 суток. На выведение ^3H существенно влияют бикарбонаты, электролитный баланс, потребление жидкости, физическая работа и окружающая температура в особенности. Однако у рабочих, хронически контактирующих с ^3H , корреляция между температурой среды и выведением ^3H отсутствует.

Известны данные о содержании ^3H и изотопов Pu глобальных выпадений в рационе населения некоторых регионов Италии с учётом геоморфологических и климатических особенностей. Содержание ^3H и $^{239+240}\text{Pu}$ в ингредиентах рациона изменяется в широких пределах. Максимальное содержание ^3H отмечено в мясе (259 мБк/г сухой массы), концентрация ^3H в яйцах, овощах, корнеплодах, рыбе, сыре, макаронах, молоке и фруктах находится в пределах 55–100 мБк/г сухой массы. Среднее содержание $^{239+240}\text{Pu}$ в овощах, муке и рыбе составляет 0,03–0,25 мБк/кг сырой массы. Максимальная концентрация $^{239+240}\text{Pu}$ в креветках — 2,5 мБк/кг сырой массы. Поступление радионуклидов с пищей равно: ^3H — 74–166 Бк/сут, $^{239+240}\text{Pu}$ — 55–74 мБк/год.

Принятая методика оценки доз трития у человека основана на равномерном распределении его в организме как тритиевой воды. Такая модель может недооценивать дозу в тканях. Из экспериментальных данных известно, что 50–80 % водорода в тканях поступает непосредственно из органически связанного водорода в пище. Концентрация трития в организме при поступлении с меченой тритием пищей, в 10–20 раз выше, чем при поступлении тритированной воды.

Предложенная модель Международной комиссии по радиационной защите не учитывает того, что органически связанный в пищевых продуктах тритий не окисляется в организме, а прямо ассимилируется в связанном состоянии, ОСТ в пищевых продуктах может увеличивать кумулятивную дозу в 1,7–4,5 раза по сравнению с дозой от свободной воды в организме.

Поступление трития населению, которое не связано с профессиональной деятельностью на радиохимических предприятиях, возможно с воздухом и с пищевыми продуктами, содержащими тритий.

Е. Л. Телушкина [1983] определяла поступление окиси трития из почвы в траву, картофель, овощи и зерно. Содержание трития в воде корнеплодов, которые находились в почве, было больше, чем в культурах, которые находились над почвой (капусте, огурцах, помидорах). В зерновых культурах (пшенице, овсе, ячмене) концентрация трития была еще меньше. Таким образом, наибольшее количество трития поступает к населению с продуктами питания (до 60–90 %), значительно меньше — с вдыхаемым воздухом и через кожу.

Литературные данные [Москалев, 1989; Бондарева, 2020] свидетельствуют о том, что при поступлении трития в организм с продуктами питания значительно увеличивается содержание органически связанного трития в органах и тканях

человека и животных. Для конструирования процесса поступления трития в организм человека с филе рыбы, содержащей тритий, мы использовали модель, предлагаемую ICRP [ICRP..., 2017], которая рассматривает в качестве основного источника поступления трития именно пищу [Бондарева, 2020].

Среди практически важных радионуклидов тритий является примером наименее избирательного распределения его в организме с относительно быстрым формированием дозы во всех богатых жидкостью средах организма.

Согласно данной модели, тритий, поступивший в организм в виде ОСТ, через желудочно-кишечный тракт всасывается в кровь и с ней распространяется во все ткани. С биологическим периодом полувыведения (6 часов) 50 % трития связывается в ОСТ с молекулами в организме человека, а оставшиеся 50 % перетрансформируются в тритиевую воду (НТО). Так же, как и в исследованиях с рыбой, связывание и выведение трития зависит от процессов метаболизма в отдельных органах и тканях. Рассматриваемая модель усредняет данные процессы и рассчитывает дозы для ОСТ во всех тканях организма, которые имеет оптимальный метаболизм с быстрым обменом веществ [Бондарева, 2020].

При поступлении НТО через ЖКТ начальный этап всасывания происходит в желудке, однако основное количество радионуклида всасывается в тонком кишечнике. Так, у человека в течение 22–55 минут всасывается 1 л НТО, при этом в венозной крови тритий обнаруживается через 2–9 минут. Пик активности в сыворотке крови и моче наблюдается через 20 минут после заглатывания. Всасывание НТО заканчивается через 40–45 минут. В последующие 2,5 часа содержание НТО в сыворотке крови сохраняется на постоянном уровне [Хайн, Браунелл, 1958; Кузин, 1962; Молекулярная биология..., 1993; Радиобиология инкорпорированных..., 2016].

Модель ICRP для поступления трития в организм человека учитывает также биокинетические параметры, значения которых зависят от состава употребляемой пищи и наличия различных химических форм ОСТ.

При употреблении тритийсодержащей пищи менее 10 % в среднем от всего трития в день накапливается в виде ОСТ (для некоторых органов установлены значения менее 3 %), остальная часть, соответственно, находится в виде НТО, которая образуется в том числе из поступившего трития в виде ОСТ в процессе метаболизма. В качестве альтернативы расчёт дозы проводится для локализации трития в ядрышке клетки [Молекулярная биология..., 1993].

Сведения о распределении трития по компонентам, биологическом времени полувыведения и установленных ICRP эффективных дозовых коэффициентах для взрослых, в зависимости от пути поступления, представлены в табл. 5.25.

С использованием приведённых параметров и с учётом полученных в модельных и натуральных экспериментах содержаний трития в филе рыбы была рассчитана эффективная доза для человека (не включая другие источники поступления). Значения указаны по нормативам ЕРА (ЕРА/630/R-00/002): разовое суточное потребление рыбы составляет 113 г. Расчёт риска проводился для условия пожизненного (70 лет) потребления рыбы человеком с массой 70 кг.

На основе проведённых расчётов выявлено следующее: при употреблении рыбы, содержащей тритий, человек потребляет $1,61 \cdot 10^{-4}$ мкГр/год, а за время всего периода жизни (примерно 70 лет) — $5,33 \cdot 10^{-3}$ мкГр. Полученные данные

много меньше значений эффективной дозы для человека, рекомендованной Санитарно-эпидемиологическими правилами и нормативами [Нормы радиационной..., 2009].

Таблица 5.25

Распределение трития между НТО и ОСТ, биологическое полувыведение и эффективные дозовые коэффициенты для взрослой возрастной группы

Распределение трития по компонентам, %	
НТО-компонент	ОСТ-компонент
50	50
Биологическое полувыведение, дней	
НТО-компонент	ОСТ-компонент
10	40
Дозовые коэффициенты, Зв/Бк	
Ингаляция	ЖКТ
$4,1 \cdot 10^{-11}$	$4,2 \cdot 10^{-11}$

По имеющимся данным [Handbook..., 2003; Чеботина, Николин, 2013], вклад питьевой воды в суммарную дозу облучения населения не является преобладающим (за исключением отдельных регионов) и обусловлен в основном присутствующими в воде радионуклидами природных рядов урана и тория. Наибольший вклад в формирование дозы облучения за счёт потребления питьевой воды вносят изотопы урана (^{238}U и ^{234}U), радия (^{226}Ra и ^{228}Ra), радон (^{222}Rn) и полоний-210 (^{210}Po), в меньшей степени — свинец-210 (^{210}Pb) и изотопы тория (^{228}Th , ^{230}Th , ^{232}Th).

Как правило, вклад в облучение присутствующих в питьевой воде калия-40 (^{40}K) природного происхождения, трития (^3H) и углерода-14 (^{14}C) космогенного происхождения и искусственных радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr пренебрежимо мал.

Одним из мест проведения исследования служила территория, расположенная в разных направлениях и на разном расстоянии от ПО «Маяк». Использовали мочу, собранную в лабораториях медицинских учреждений пяти пунктов наблюдений в 2008 г. Исследуемый контингент включал людей разного пола, возраста и места работы, количество испытуемых составило 45 человек. В отдельных случаях в 2010–2011 гг. пробы мочи отбирали непосредственно у жителей г. Озерска, не работающих на ПО «Маяк».

Как видно из рис. 5.10, концентрация трития в моче людей, проживающих в зоне воздействия ПО «Маяк», в период исследований изменялась в пределах от 100 до 800 Бк/л в зависимости от расстояния до предприятия. Наиболее высокие показатели отмечены для жителей г. Озёрска, поселков Татыш и Кыштым, которые расположены наиболее близко от предприятия, а наиболее низкие — для относительно удалённых населённых пунктов Касли и Метлино. Статистическая обработка всей совокупности данных с помощью компьютерной программы *Statistica* по методу Фишера позволила установить наличие достоверной обратной корреляционной связи между концентрацией трития в моче людей и расстоянием от пункта наблюдения до предприятия.

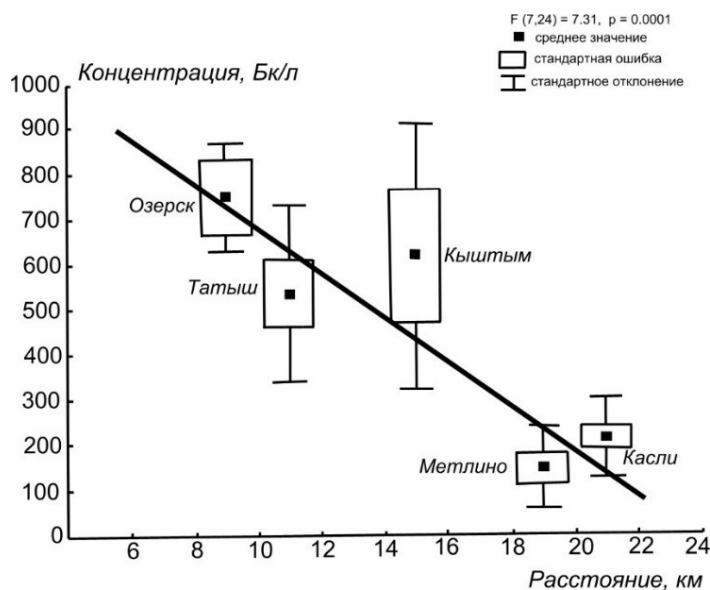


Рис. 5.10. Уровни содержания трития в моче людей различных пунктов наблюдений зоны воздействия ПО «Маяк»

Учитывая тот факт, что уровни содержания трития в питьевой воде района ПО «Маяк» сравнительно невысокие (см. раздел 2 монографии), мы можем предположить, что основной источник поступления радионуклида в организм жителей рассматриваемого региона — воздушные выбросы предприятия.

В табл. 5.26 приведены величины индивидуальных доз внутреннего облучения от трития, рассчитанные по данным 2008 г., для людей, проживающих в исследованных пунктах наблюдения. Как видно из таблицы, они колеблются в пределах 3–14 мкЗв/год и составляют 0,3–1,4 % от предела дозы для населения (1 мЗв/год) [Нормы радиационной..., 2009].

Таблица 5.26

Индивидуальные дозы облучения людей за счёт поступившего в организм трития, мкЗв/год

Озёрск	Кыштым	Татыш	Касли	Метлино
13,7	11,4	10,3	4,0	2,9

Объектами исследования в г. Озёрске и на прилегающей к нему территории служили дождевые и снеговые осадки, вода озер Иртяш, Б. Наного и истока реки Теча, водопроводная вода города, лёд из холодильника, моча людей.

Содержание трития в моче людей, проживающих в районах расположения предприятий ЯТЦ, может различаться в зависимости от времени наблюдений, их возраста, места работы и проживания, режима работы предприятия и прочих факторов. Согласно данным работы [Chebotina, Nicolin, 2006], у детей г. Озёрска в период 1980–1998 гг. концентрация трития составляла в среднем 1140–1460 Бк/л, а на прилегающих территориях (Касли, Тюбук) — 810–1160 Бк/л. В 2001 г. у взрослых мужчин и женщин, проживающих в г. Озёрске, но не работающих

Таблица 5.27
Уровни концентраций трития
в моче жителей г. Озёрска

Год наблюдений	Концентрация трития, Бк/л
2008	1260
	998
	836
	668
2010	67 ± 6*
	49 ± 2*
	37*
	56*
	130 ± 15

* Показатели у жителей г. Озёрска, которые в период исследований не работали на ПО «Маяк».

на предприятии, содержание радионуклида в моче находилось на уровне 126 ± 10 Бк/л, причём независимо от пола. Согласно нашим данным, полученным в 2008–2009 гг. (произвольная выборка из числа жителей г. Озёрска), содержание радионуклида в моче изменялось в широком диапазоне, при этом различия между крайними значениями составляли более 300 раз. У людей, не работающих на предприятии, концентрация трития в моче была заметно ниже, чем в среднем по всей совокупности испытуемых (табл. 5.27).

Снижение концентраций трития в моче (выборка из числа взрослых жителей г. Озёрска — 22 человека) до 18 ± 1 Бк/л, возможно, связано с сокращением объёма производства и с использованием более точных

методов анализа по сравнению с предыдущим периодом исследований.

Представляет интерес сравнить уровни концентраций трития в моче людей, проживающих в зоне воздействия ПО «Маяк», с литературными данными для других территорий мира (табл. 5.28). В последнем случае они заметно ниже, что свидетельствует о вкладе ПО «Маяк» в загрязнение тритием исследуемой территории.

Таблица 5.28
Уровни содержания трития в моче людей в различных странах мира

Страна	Условия проживания	Концентрация НТО, Бк/л	Литературный источник
Китай	Расстояние от Циньшаньской АЭС		[Bao-Ming Shen, 2015]
	2 км	3,5 ± 1,6	
	10 км	2,1 ± 0,6	
	22 км	3 ± 0,8	
Финляндия	Население	2,55 (среднее), 18,3 (максимальное)	[Puhakainen, Heikkinen, 2008]
Канада	Оттава, 200 км к востоку от исследовательского реактора	6,5	[Kotzer, Trivedi, 2001]
	10 км от реактора Дин-Ривер	15,9	
	2 км от Вольсунгской АЭС	16,4–31,4	[Tritium analysis..., 2011]
Корея	Не идентифицировано	1,8–5,6 (среднее 2,8–1,4)	[Yoon, 2013]

Ещё одно из мест исследований — территория Белоярской АЭС. Объектом исследования была моча местного населения — жителей г. Заречный. Образцы были получены в клинической лаборатории медсанчасти города. Количество испытуемых составляло 50 человек, различавшихся по возрасту и полу, выступивших в качестве добровольцев. Исследования проводились в период с января по ноябрь 2015 г. среди подростков в возрасте 15–18 лет и взрослого трудоспособного населения (возрастные интервалы — 20–25, 27–39 и 45–57 лет). Возрастные группы формировались без каких-либо предпочтений исследователей [Тритий в моче..., 2016].

Для исследований были предоставлены пробы мочи объёмом 200 мл. Все испытуемые проживают в г. Заречный. Данные по содержанию трития в пробах питьевой воды из системы городского водоснабжения были получены непосредственно нами; кроме того, были использованы статистические результаты, приведённые в работах М. Я. Чеботиной с коллегами, в которых также описываются источники водоснабжения исследуемого региона [Chebotina, Nicolin, 2006; Чеботина, Николин, 2013].

Пробы воды отбирались произвольно, в течение всего времени проведения исследований, то есть с января по ноябрь 2015 г. Режим отбора и определения содержания трития также произвольный, но не реже двух раз в месяц. Отбор производился из одних и тех же источников водоснабжения (то есть в одних и тех же пунктах: квартиры, административные учреждения) и в одно и то же время [Тритий в моче..., 2016].

В лаборатории пробы мочи подвергали очистке. Для устранения матрицы, содержащей значительное количество солей, пробы очищались методом отгонки азеотропной смеси с толуолом на установке, созданной Л. Г. Бондаревой [Bondareva, Schultz, 2015; Бондарева, 2020]. После отделения матрицы водный раствор очищали от возможных окрашенных соединений для устранения эффекта гашения в соответствии с проведёнными ранее исследованиями [Бондарева, Помозова, 2009] и рекомендациями [Методы измерения..., 1978; Дозиметрический и радиометрический..., 1980].

Пробы воды не требовали дополнительной очистки и непосредственно перед измерением фильтровались через мембранный фильтр, с диаметром пор 0,45 мкм. Перед измерениями в чистые виалы наливали сцинтилляционный коктейль Ultima Gold AB (объём 12 мл), охлаждали до заданной температуры в отсутствие света. Затем пипеткой отбирали необходимый объём исследуемого образца (8 мл) и вводили в виалу. Виалу закрывали пробкой и встряхивали до полного смешивания пробы со сцинтилляционным коктейлем.

Перед измерениями смесь выдерживалась в тёмном и прохладном месте в течение 24 часов для стабилизации люминесценции. Стандартные и фоновые пробы готовили одновременно с основными — чтобы свести к минимуму ошибку измерения. Время измерения исследуемых проб составляло 8–24 часов.

Содержание трития в исследуемых пробах измеряли с использованием жидкостно-сцинтилляционного спектрометра низкофонового α - β -радиометра Quantulus-1220 (Perkin Elmer, США).

Все полученные результаты подвергались статистической обработке в соответствии с руководством Ю. С. Другова и А. А. Родина [2009]. Среднее значение X_{cp} рассчитывали из каждой совокупности данных по каждому определяемому параметру:

$$X_{\text{cp}} = \frac{\sum_n^1 X}{n},$$

где X — значение определяемого параметра; n — количество измерений.

Далее рассчитывали среднеквадратичную ошибку, вызванную разбросом экспериментальных данных:

$$S_x^2 = \frac{1}{(n-1)n} \cdot \sum_{i=1}^n (x - x_{\text{cp}})^2.$$

После этого, используя значение коэффициента Стьюдента ($t_{\text{ан}}$), при доверительной вероятности $p = 0,95$, при $n = 2-3,4$, при $5-2,8$ и т. д., при $n = 12-2,1$ рассчитывали доверительный интервал:

$$\Delta = t_{\text{ан}} \cdot \sqrt{S_x^2}.$$

Данные по определению трития в моче исследуемых людей разного пола и возраста приведены в табл. 5.29. Результаты получены для всех групп в одинаковые временные интервалы. В период всего исследования принимали участие одни и те же люди, за незначительными единичными исключениями, что практически не повлияло на общее количество испытуемых.

Таблица 5.29

Средняя концентрация трития в пробах мочи исследуемых лиц, г. Заречный, и доверительный интервал ($\pm \Delta$) [Тритий в моче..., 2016]

Возраст	15–18 лет		20–25 лет		27–39 лет		45–57 лет	
Пол	Муж.	Жен.	Муж.	Жен.	Муж.	Жен.	Муж.	Жен.
$C_{\text{cp}}(^3\text{H})$ $\pm \Delta$, Бк/л	31 \pm 17	23 \pm 19	19 \pm 9	12 \pm 3	65 \pm 21	50 \pm 12	60 \pm 15	55 \pm 17

Как видно из табл. 5.29, среднее содержание трития в пробах мочи варьируется от 12 до 65 Бк/л, общее среднее значение составляет приблизительно 39 Бк/л, при этом различие содержания трития в отобранных в один и тот же период времени пробах мочи мужчин и женщин было незначимым, то есть находилось в пределах статистической погрешности.

Полученные результаты (табл. 5.29) указывают на наличие определенной зависимости содержания трития от возраста испытуемого. Так, в возрастной группе 15–25 лет среднее содержание трития составляет примерно 21 Бк/л, тогда как в более старшей группе — примерно 57 Бк/л.

Полученные в период исследования результаты определения трития в отобранной в водопроводной системе г. Заречный питьевой воде приведены в табл. 5.30. На рис. 5.11 представлена корреляционная зависимость между средней концентрацией трития в пробах мочи исследуемых лиц в определённый период и средней концентрацией трития в питьевой воде в этот же период (на основании среднестатистических исследований по г. Заречный и собственных результатов). В исследуемый период содержание трития в питьевой воде варьировалось в интервале от 15 до 55 Бк/л.

Таблица 5.30

Средняя концентрация трития в питьевой воде в январе-ноябре 2015 г., Бк/л, и доверительный интервал ($\pm \Delta$) [Тритий в моче..., 2016]

Месяц	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
C_{cp}	15 ± 3	16 ± 2	21 ± 4	18 ± 3	32 ± 6	55 ± 5
Месяц	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	
C_{cp}	53 ± 3	42 ± 7	34 ± 5	19 ± 6	27 ± 4	

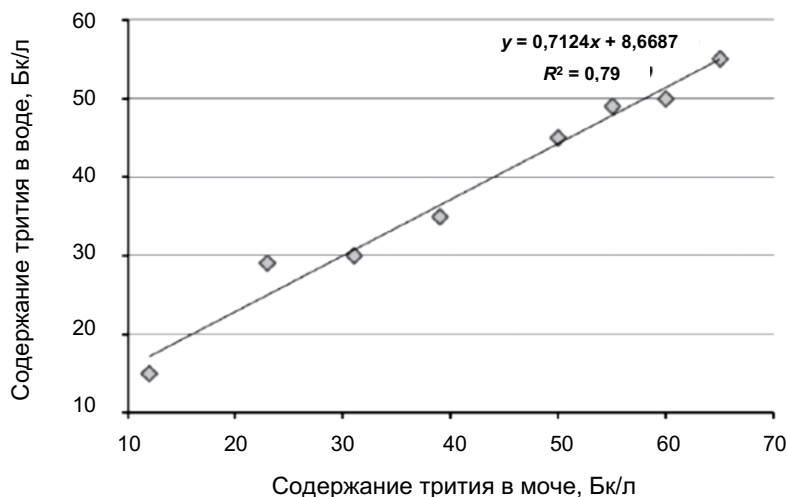


Рис. 5.11. Корреляционная зависимость между содержанием трития в моче и питьевой воде [Чеботина и др., 2016]

Соотношение между содержанием трития в моче и питьевой воде составило 0,979, уровень значимости — 0,007. Статистическая обработка всей совокупности данных с помощью компьютерной программы Statistica по методу Фишера позволила установить наличие достоверной прямой корреляционной связи между концентрацией трития в моче людей и концентрацией трития в питьевой воде, что не противоречит полученным ранее данным для других исследований по представленной теме [Schell et al., 1974; Baumgartner, Kim, 2000; Baumgartner et al., 2001; Harrison et al., 2002].

Тритий, поступивший в виде тритиевой воды (НТО), достаточно быстро выводится, при этом в организме протекают быстрые физиологические процессы, связанные с обменом тритиевой воды с жидкостью организма, в частности с переводом в продукты выделения — мочу.

Определены, согласно расчетам [Low level..., 1998], индивидуальные дозы для населения, их значения варьируются в интервале от 0,32–1,2 мкЗв/год, при учёте потребления 100 л в месяц питьевой воды (согласно нормативам потребления питьевой воды для исследуемого региона), что составляет 0,032–0,12 % от предела дозы для населения (1 мЗв/год) [Chebotina, Nicolin, 2006].

Так как практически на всех исследуемых участках экосистемы реки Енисей и в системе питьевого водоснабжения тритий находится на уровне

фоновых значений (2–6 Бк/л), его содержание в моче населения находится в прямой зависимости от его же концентрации в питьевой воде, как и выявленная для Уральского региона закономерность. Тогда индивидуальная доза, полученная при приёме внутрь питьевой воды, будет составлять менее 1 % от предела дозы для населения [Тритий в моче..., 2016]. Следовательно, содержание трития в питьевых источниках экосистемы реки Енисей не вносит значительного вклада в дозовую нагрузку населения и может не учитываться при оценке риска [Ракитский и др., 2020].

Имеется не менее 9 публикаций (1968–1997 гг.) авторов из разных стран, и в них, наряду с общеизвестным экспоненциальным выведением НТО с мочой ($T_1 = 3–8$ сут), обнаружены вторые экспоненциальные компоненты выведения с более длительным периодом T_2 ; соответствующие многократные измерения продолжались от 130 до 640 суток (табл. 5.31) [Балонов, Чипига, 2016].

Таблица 5.31

Биологические периоды снижения концентрации трития в моче после поступления НТО (диапазон индивидуальных значений, среднее \pm стандартная ошибка среднего)

Литературный источник (автор)	Число лиц	Длительность наблюдения, сут	Биологический период, сут		
			T_1 (вода тела)	T_2 (ОСТ-1)	T_3 (ОСТ-1)
Urinari excretion..., 1968	1	255	8,7	34	–
Sanders, Reinig, 1968 ^{1*}	1	415	6,1	23	344
Minder, 1969 ^{2*}	1	480	10–30	139–230	
Lambert et al., 1971	1	161	9,1	36	–
Moghissi et al., 1972 ^{3*}	3	495, 632	–	21, 26	280 550 \pm 140 350 \pm 190
Henry, 1972	1	280	7,5	63	–
Balonov et al., 1974	5	300	11–13 (ср. 11,9 \pm 0,3)	39–76 (ср. 51 \pm 7)	–
Rudran, 1988 ^{4*}	8	130–640	3,3–7,7 (ср. 6,0 \pm 0,6)	31–226 (ср. 82 \pm 24)	–
Nrivedi et al., 1997 ^{5*}	8	300	6,2–12,8 (ср. 8,4 \pm 0,7)	58–104 (ср. 74 \pm 6)	–

^{1*} Получал диуретик в течение 3–35 сут после поступления НТО.

^{2*} Через 140 суток после прекращения работы с газообразным Т и тритиевыми светосоставами. Диапазон значений — для разных способов обработки данных.

^{3*} Данные трёх работников с тритиевыми светосоставами, полученные через 6–10 месяцев после прекращения работы.

^{4*} Данные наблюдений работников тяжеловодного реактора после однократного или хронического поступления НТО.

^{5*} В начальный период работники получали повышенное количество воды, при этом биологический период составлял 5,0–8,1 суток (среднее 6,3).

Для количественного анализа наиболее подходят данные долгосрочных наблюдений за концентрацией трития в воде тела (моче) с момента однократного поступления НТО, многократно превосходящего прежние поступления. Однако в работе (Moghissi et al., 1972) наблюдение началось намного позже, и само поступление было скорее хроническим, чем однократным.

Несмотря ни на что, результаты этих исследований свидетельствуют о том, что радиационная опасность, связанная с инкорпорацией трития, в том числе и в виде органической компоненты, хотя и невелика, но при оценке суммарной дозы облучения ее необходимо учитывать, тем более что период полувыведения трития из органических структур во много раз больше, чем из водной фазы органов и тканей (Балонов, Чипига, 2016).

По-видимому, в клинических условиях на основании этих данных можно судить о тяжести лучевых поражений отдельных больных при радиационных воздействиях, так как прогноз заболевания будет зависеть не только от суммарной дозы, но и от состояния облученного организма. С увеличением тканевых доз скорость выведения трития из организма уменьшается вследствие снижения водного обмена и увеличивается включение трития в органические структуры. В литературе имеются сведения о содержании трития в структурных элементах органов и тканей человека (Балонов, Чипига, 2016).

Некоторые авторы считают, что в организме человека при хроническом поступлении НТО содержание органически связанного трития может быть гораздо больше. Так, У. Силентаг [W. Seelentag] с соавторами указывает, что у рабочего, имевшего контакт с различными радиоактивными веществами в течение 27 лет, общая доза облучения организма составила 5 Зв [A Catalogue of Spectra..., 1979]. Значительное увеличение суммарной дозы связано с инкорпорированием трития в органические молекулы. При хроническом поступлении трития в организм содержание ОСТ может составлять от 10 до 20 % общего количества трития, находящегося в организме. Период полувыведения медленно обмениваемой фракции был равен 80 суток.

Немаловажным является микрораспределение трития в органах и тканях. Это позволяет оценить особенности его включения в различные структуры клеток. Микрораспределение трития в организме изучали многие исследователи с помощью метода гистоауторадиографии.

В. С. Калистратова, О. А. Кочетков и Д. И. Кабанов в опытах на крысах показали, что распределение трития в отдельных компонентах крови происходит неодинаково [Калистратова и др., 2014]. Наибольшее его количество обнаруживается в сыворотке крови, лейкоцитах, наименьшее — в эритроцитах. В почках наибольшее содержание трития наблюдается в корковом слое, в мозговом слое его почти в 2 раза меньше. Отсутствуют различия в уровнях накопления НТО в протоплазме и ядре клеток, что резко отличает ее от тимидина, который включается только в ядро.

На основании данных гисторадиографии можно сделать вывод: тритий в основном распределяется равномерно по всей структуре органа, исключение — почки и ЖКТ. Это, по всей вероятности, связано со значительной реабсорбцией НТО в канальцах почек, составляющих основную часть коркового слоя почек. В кишечнике наибольшее количество зёрен наблюдалось в ворсинках, в подслизистой и мышечной оболочках их значительно меньше.

В опытах на крысах В. Ф. Журавлев [1990] изучал микрораспределение ^3H -тимидина и ^3H -цитидина, оба соединения быстро включаются в клеточные структуры органа. Метка предшественников РНК и ДНК уже через 15 минут после введения обнаруживается во всех исследуемых органах. Максимальное накопление ^3H -тимидина в тканях происходит через 6 часов. Включение метки ^3H -цитидина в протоплазму и структурные элементы клеток происходит более интенсивно, чем ^3H -тимидина, однако ^3H -цитидин включается в ядра клеток лишь в ранние сроки (первые 1–2 часа), в то время как ^3H -тимидин в основном определяется в ядрах клеток длительный период времени.

Таким образом, почки, органы дыхания и ЖКТ — основные пути выведения трития из организма. Тритий выделяется также через слюнные и потовые железы и с молоком. Газообразный ^3H , вследствие своей инертности, из организма выделяется очень быстро. При дыхании и через кожу выделение происходит по экспоненциальному закону, с четырьмя периодами полувыведения: T_1 — 3,3 мин, T_2 — 14,5 мин, T_3 — 53,1 мин и T_4 — 3 суток. Наибольшее количество ^3H (до 82–95 %) выводится с первым периодом, со вторым и третьим — 0,97–4,3 %, с четвёртым — 0,1–0,03 %. Суммарная активность трития, выделяемая через кожу (^3H -НТО), составляет примерно 20 % общего количества трития, обнаруживаемого в организме.

Выделение НТО из организма происходит значительно медленнее и зависит от интенсивности водного обмена. В табл. 5.32 приведены данные по периодам полувыведения окиси трития из организма различных животных и, как видим, этот период различный, быстрее всего тритий выводится из организма мыши, медленнее — из организма лошади. Особое положение занимают кенгуровые крысы. Среда обитания в условиях жаркого климата приспособила крыс к очень малой потере жидкости, вследствие чего водный обмен у них замедлен и период выведения окиси трития имеет большую продолжительность.

Таблица 5.32

Периоды полувыведения окиси трития у животных
[Радиобиология инкорпорированных..., 2016]

Вид животного	T_6 , сут	Вид животного	T_6 , сут
Собака	$5,14 \pm 0,88$	Крыса	$3,53 \pm 0,40$
	3,5–5,5		$3,38 \pm 0,15$
Лошадь	$8,41 \pm 0,18$		3,6
Мышь	1,9		2,5 и 64
	1,1	Кенгуровая крыса	13,9–22,1
	$1,13 \pm 0,14$	Кролик	$3,87 \pm 0,26$
	$2,16 \pm 0,24$	Морская свинка	$3,0 \pm 0,26$
	1,5–2,5		$4,53 \pm 0,58$
	3,3	Хомяк	$11,82 \pm 2,96$

Период полувыведения НТО из организма человека находится в пределах от 6 до 14 суток, составляя в среднем 10 (табл. 5.33), к тому же он зависит

от возраста и времени года. Выведение НТО из организма ускоряется с увеличением возраста человека, а также весной и летом.

Таблица 5.33

Периоды полувыведения НТО из организма человека
[Радиобиология инкорпорированных..., 2016]

Возраст, лет	$T_{\frac{1}{2}}$, сут	Возраст, лет	$T_{\frac{1}{2}}$, сут
20–29	9,14, в среднем 10	20–29	10,5
30–39	9,46 ± 0,88	30–39	9,5
40–49	8–12	40–49	9,0
40–49	6,4–12,1, в среднем 8,5	50–59	8,2
40–49	7,5 ± 1,9	40–49	8,3 (весной)
50–59	9	40–49	8,3 (летом)
20–29	12,1–13,4	50–59	10,4 (зимой)
20–29	9,5 ± 4		

В период середины с 1950-х до 1973 гг. проведены исследования, в результате которых были получены в том числе и зависимость периода полувыведения НТО от количества выпитой жидкости [Radiotoxicity of tritium..., 1973]. К примеру, у одного субъекта при ежедневном употреблении воды в количестве 2,7 л биологический период полувыведения НТО составлял 10 суток, при увеличении потребления до 12,8 л/сут он снизился до 2,4 суток.

Как отмечалось выше, органы дыхания являются важным путём выведения НТО из организма. Так, после внутривенного введения $23,6 \cdot 10^4$ Бк наибольшая концентрация в водяных парах выдыхаемого воздуха обнаруживается через 9 минут. Концентрация трития в водяных парах составляет приблизительно 94 % концентрации активности в плазме и моче.

Материалы исследований по кинетике обмена трития свидетельствуют, что этот он связан не только с водой, но и с органическими структурами организма. Это подтверждается несколькими периодами полувыведения трития из организма. Обнаружено существование фракций окиси трития с биологическим периодом полувыведения более 90 суток. Доля трития, выводящегося из организма с малым периодом полувыведения, характеризует скорость обновления воды, а доля активности, выводящейся медленно, представляет собой мобилизацию экскреции трития, связанного с органическими структурами. Аналогичные данные о существовании второго длительного периода полувыведения трития из организма были получены в работах В. Ф. Журавлева с соавторами [Журавлев и др., 1974, 1976]. После однократной ингаляции в концентрации (8,14–13,32) 10^7 Бк/л второй период полувыведения трития из организма крыс составлял 64 дня, из организма собак — 30–50. У собак со вторым периодом выделялось не более 1 % введённой активности оксида трития. Было показано, что через 5–7 суток после введения из организма выводится до 90 % всей активности, из общей суммарной дозы на сухой остаток приходится 4–6 %.

Несколько по-иному выделяются из организма животных меченные тритием этиловый спирт и диоксифенилаланин (^3H). Как показали исследования, при пероральном введении крысам тритированного этилового спирта основная

часть активности (63 %) выводится из воды с периодом полувыведения 6,5 суток, быстро выводющаяся часть (37 %) — с периодом 0,5 суток. Период полувыведения 60 % трития из структурных элементов организма — 1,1 суток, медленно выводющейся фракции (40 %) — 35,4 суток. За 16 суток с мочой выводится 24,3 %, а при дыхании за 15 мин — 12 %.

Еще быстрее выводится из организма диоксифенилаланин (^3H): с первым периодом (0,14 суток) выводится 57,3 %, со вторым (1,5) — 40 %, с третьим (13) — 1,5 %, с четвертым (202) — 1,2 %.

Медленно выводится из организма ^3H -тимидин: с первым периодом (8,6 суток) выводится 62 %, со вторым (272) — 38 %. ^3H -этиленгликоль выводится с тремя периодами полувыведения: быстро выводющаяся фракция (1,6 суток) — 55 %, второй период (11,6) — 20 % и третий (254) — 25 % [Журавлев, 1968; Екидин и др., 2012]. Эти данные свидетельствуют о том, что химическая форма соединения трития определённо влияет на скорость его выведения из организма.

Таким образом, кинетика обмена трития в организме при поступлении тритированных органических соединений отличается от таковой при введении НТО. Скорость выведения трития из организма при введении меченных тритием органических соединений меньше, чем НТО. Это способствует созданию в организме более высоких уровней поглощённых тканевых доз по сравнению с таковыми при введении НТО. Токсичность органических тритированных соединений выше, чем токсичность НТО.

Допустимое содержание меченных тритием соединений в организме человека должно быть ниже значения, приведённого в НРБ-99 для НТО [Нормы радиационной..., 2009]. Для таких соединений, как ^3H -этиленгликоль, ^3H -тирозин, ^3H -холестерин, ^3H -стеариновая кислота, поступление и допустимое содержание должно быть снижено в 2 раза по сравнению с НТО; для ^3H -тимидина, ^3H -цитидина допустимое поступление в организм должно быть в 8–10 раз меньше, чем НТО.

Большинство авторов считает, что газообразный ^3H менее токсичен, чем НТО, однако непосредственных данных о параметрах токсичности не приведено. Вместе с тем знание остро-, подостро- и хронически эффективных доз газообразного ^3H очень необходимо для оценки допустимых уровней воздействия его на организм человека.

Е. Пинсон и У. Лэнгхэм ещё в 1957 г. указали, что вследствие низкой растворимости трития в жидких средах организма НТО представляет большую биологическую опасность, чем газообразный ^3H [Pinson, Langham, 1957]. Газообразный ^3H , подобно инертным газам, растворяется в жидкостях тела в очень незначительных количествах и быстро выводится из организма. Опасность облучения организма газообразным ^3H примерно в 1000 раз меньше, чем НТО, однако автор не исключает возможности максимальной опасности острого облучения смесью газообразного ^3H и воздуха вследствие окисления трития до НТО при воспламенении взрывчатой смеси.

В исследованиях В. Ф. Журавлева с коллегами [1976] приведены данные о токсичности газообразного ^3H : для мышей $\text{LD}_{50/30}$ составляет $(7,1 \pm 0,23) \cdot 10^4$ Бк/л; для крыс при ингаляции газообразного ^3H — $(2,4 \pm 0,05) \cdot 10^4$ Бк/л. При воздействии высоких концентраций, когда уровни тканевых доз соответствуют 10–50 Гр, большинство животных погибает в течение первых двух недель. Как было отмечено ранее, НТО обладает большей, по сравнению с ^3H , токсичностью.

В табл. 5.34 приведены среднелетальные количества НТО для различных сроков и разных видов животных [Радиобиология инкорпорированных..., 2016].

Таблица 5.34

Среднелетальные количества НТО для различных сроков, мБк/г

Вид животного	ЛД _{50/15}	ЛД _{50/30}	ЛД _{50/60}
Собака	6,21 ± 0,02	5,55 ± 0,01	5,55 ± 0,03
Кролик	16,65 ± 0,03	16,23 ± 0,01	12,95 ± 0,06
Крыса	41,4 ± 0,14	37,0 ± 0,15	33,04 ± 0,048
Мышь	17,39 ± 0,068	12,58 ± 0,028	10,36 ± 0,021
	ЛД _{50/120}	ЛД _{50/240}	ЛД _{50/360}
Собака	5,55 ± 0,03	5,55 ± 0,03	5,55 ± 0,03
Кролик	12,58 ± 0,13	11,84 ± 0,05	7,03 ± 0,12
Крыса	29,6 ± 0,061	20,72 ± 0,064	18,87 ± 0,076
Мышь	7,4 ± 0,019	5,92 ± 0,017	2,93 ± 0,008

Из табл. 5.34 видно, что для всех сроков наблюдения ЛД_{50/30} для собак значительно меньше, чем для крыс, кроликов и мышей. При сравнении чувствительности различных видов животных к НТО по величине ЛД_{50/30} видно, что собаки в 7 раз, а кролики в 2,5 раза чувствительнее крыс. По чувствительности мыши занимают второе место после собак. Клиническая картина поражения НТО у различных видов животных однотипна: в ранние сроки после начального периода возбуждения у животных развивается слабость, адинамия, вялость, снижается пищевая возбудимость вплоть до отказа от пищи; уменьшается масса тела. При воздействии остроэффективных доз ($0,55 \cdot 10^7$ Бк/г) развиваются серозно-геморрагический ринит, блефарит, энтероколит. На 5–7 сутки проявляется геморрагический синдром. Удлиняется время свёртывания крови, повышается проницаемость кожных сосудов, появляется кровь в кале и моче. Возникают мелкие единичные и множественные кровоизлияния в коже, слизистых оболочках, внутренних органах. Изменяется морфологический состав крови. Снижается содержание гемоглобина, лейкоцитов, эритроцитов, тромбоцитов и ретикулоцитов. Наблюдаются качественные изменения клеток крови: токсическая зернистость нейтрофилов, гиперсегментоз ядер, вакуолизация протоплазмы лимфоцитов, повышенный цитоллиз. В острой стадии поражения отмечается резкое угнетение костномозгового кроветворения. В пунктатах костного мозга встречаются лишь единичные пикнотичные одноядерные клетки, эритробласты и нейтрофилы [Радиобиология инкорпорированных..., 2016].

Патоморфологические изменения при поражении НТО в острой стадии поражения характеризуются гемодинамическими расстройствами и дистрофическими изменениями клеточных элементов внутренних органов. У животных нарушается синтетическая функция печени, возникают изменения в углеводном и жировом обмене, отмечается раннее торможение диуреза. В моче наблюдаются желчные пигменты, следы белка, кристаллы билирубина. Происходят выраженные изменения в антиинфекционной резистентности, в развитии аутоаллергических процессов, нарушается бактерицидная способность кожи.

Изучена сравнительная токсичность НТО на различных видах животных. Показано, что собаки оказались наиболее чувствительными к НТО, чем кролики и крысы: в 3 раза восприимчивее первых и примерно в 7 раз — вторых [Радиобиология инкорпорированных..., 2016].

При введении малых количеств НТО ($(0,037-0,018) \cdot 10^4$ Бк/г) у животных развивается хроническая форма поражения, которая характеризуется некоторым раздражением органов кроветворения. Крысы получали НТО с питьевой водой в течение 6 месяцев. Удельная активность воды составляла $34 \cdot 10^3$, $13,69 \cdot 10^4$, $27,38 \cdot 10^4$, $5,4 \cdot 10^5$ и $10,8 \cdot 10^5$ Бк/мл. Исследования показали, что при хроническом поступлении НТО в организм большая доля радионуклида внедряется в структурные элементы органов по сравнению с содержанием его в водной фазе. Значительное количество опухолей молочных желез обнаружено у крыс при воздействии НТО в концентрации $27,38 \cdot 10^5$ Бк/мл. У крыс-самок количество опухолей молочных желез составило 31,8 %, в контрольной группе — 20 %. Хроническое действие НТО в концентрации $27,38 \cdot 10^5$ Бк/мл снижает среднюю продолжительность жизни крыс. Концентрация $13,69 \cdot 10^5$ Бк/мл не уменьшает среднюю продолжительность жизни животных и не увеличивает выход опухолей молочных желез. В хронической фазе поражения наблюдается развитие сосудистого нефросклероза и угнетение лимфопоэза в селезёнке и лимфатических узлах. В отдалённые после поражения НТО сроки у животных развиваются различной локализации новообразования. При воздействии НТО в дозе $1,11 \cdot 10^7$ Бк/г у 26 % крыс развивается хроническая форма лейкоза. У самцов-крыс лейкозы встречаются гораздо чаще, чем у самок: так, при введении НТО в дозе $1,11 \cdot 10^7$ Бк/г лейкозы у самцов возникали в 46 % случаев, у самок — в 15,7 % случаев. Опухоли молочных желез развиваются у 66,7 % самок и у 6,5 % самцов. Минимальная доза, вызывающая развитие опухолей молочных желез, — 0,5 Гр. При воздействии этой дозы НТО опухоли парашитовидных желез возникают у 38,7 % самцов и 15,7 % самок, щитовидных желез — у 19,6 % самок и 8 % самцов. При воздействии НТО в дозе $1,11 \cdot 10^7$ Бк/г встречаются опухоли гипофиза и яичников. Так, опухоли гипофиза развиваются у 31,4 % самцов и 11,3 % самок, яичника — в 3,9 % случаев [Радиобиология инкорпорированных..., 2016].

В. Ф. Журавлев [1990] изучал отдалённые эффекты биологического действия НТО у кроликов. Через год после введения НТО в дозе $1,11 \cdot 10^7$ Бк/г у некоторых животных развился сарколейкоз. На вскрытии обнаружено увеличение селезенки в 10 раз по сравнению с контролем. Печень глинистого вида, почка с обширными беловато-жёлтыми очагами. В брыжейке, средостении, на месте вилочковой железы обнаружены множественные лимфомы. В печени и селезёнке также наблюдали увеличенные лимфатические узлы. Костный мозг имел зеленовато-серый оттенок, кровь цвета кофе с молоком.

Для оценки биологического действия НТО огромное значение имеют исследования по изучению относительной биологической эффективности (ОБЭ). В техническом докладе МАГАТЭ [Определение поглощённой..., 2004] приводятся сведения о том, что тритий примерно в 1,7 раза эффективнее γ -излучения ^{60}Co . По сравнению с β -излучением ^{32}P , ОБЭ НТО следует считать равным трём. При проведении оценки с помощью линейной потери энергии ОБЭ НТО (по сравнению с рентгеновским и γ -излучениями) составляет 2,5–3,0 [Определение поглощённой..., 2004].

Исходя из этого, сделано предположение о том, что коэффициенты ОБЭ трития, по сравнению с действием рентгеновского излучения, не должны превышать 1,2–1,4 (табл. 5.35) [Радиобиология инкорпорированных..., 2016].

Таблица 5.35

Относительная биологическая эффективность НТО

Тест	Сравниваемые источники излучений	ОБЭ
Рассчитано по ЛПЭ	НТО:γ	1,7
Летальный эффект (мышь)	НТО:Х*	2,5–3,0
Трансформация зубной железы, селезёнки (мышь)	НТО:γ	1,7–1,4
Трансаминазная активность печени крыс	НТО:γ	1,5
Летальный эффект (крыса, мышь)	НТО:γ	2,8–2,9
Опухоль молочной железы (крыса)	НТО:γ	1,0
Лейкозы (крысы-самцы)	НТО:γ, Х, протоны	4,0
Самки	НТО:γ, Х, протоны	1,3–1,4
Летальный эффект (крыса)	НТО:γ	1,6
Реакция лейкоцитов и лимфоцитов (крыса)	НТО:γ	1,9
Изменение массы зубной железы (крыса)	НТО:γ	1,61–2,09
Изменение массы селезенки (крыса)	НТО:γ	1,74–1,89
Радиочувствительность бактерий <i>E.Colli</i>	НТО:γ	1,2

Примечание. Рентгеновское излучение.
ЛПЭ — линейная передача энергии.

В. Ф. Журавлев с коллегами в опытах на крысах изучали ОБЭ окиси трития в сравнении с внешним γ-излучением ^{137}Cs при использовании различных показателей: например, по изменению продолжительности жизни крыс окись трития значительно эффективнее внешнего γ-облучения ^{137}Cs , ОБЭ составляет 1,6; по реакции лейкоцитов и лимфоцитов ОБЭ в среднем соответствует 1,9; по изменению массы зубной железы и селезенки находится в пределах 1,61–2,09, и 1,74–1,89 соответственно [Журавлев и др., 1974, 1976].

Л. Д. Мурзина и К. Н. Муксинова [1982] изучали на крысах ОБЭ окиси трития по сравнению с внешним γ-облучением. Хроническое действие окиси трития вызывает в 1,9 раза большее уменьшение общего количества миелокариоцитов по сравнению с внешним γ-облучением в той же дозе. Эффективность окиси трития в нарушении эритропоэза была в 4 раза выше по сравнению с γ-облучением ^{137}Cs .

В. С. Ревина с соавторами [1984] изучали отдалённые эффекты действия трития у крыс. Окись трития в дозе $37 \cdot 10^4$ Бк/г вводили крысам внутривентрикулярно в течение 6 месяцев, другая группа крыс была облучена на установке с ^{137}Cs в эквивалентной дозе. Количество крыс со злокачественными опухолями при введении окиси трития составляло 55 %, при γ-облучении — 30,7 %, в контроле — 25 %. Разница в частоте злокачественных опухолей у животных обусловлена у получавших окись трития крыс увеличением числа лейкозов

в 1,5 раза, опухолей кожи и подкожной клетчатки — в 1,7 раза. Кроме того, у крыс, получавших окись трития, найдены злокачественные опухоли лёгких (11 %), молочной железы (6,7 %), костной ткани (4,4 %), надпочечников (2,2 %), печени (2,2 %), которые не были обнаружены у животных после γ -облучения. Более высокий бластомогенный эффект окиси трития, по-видимому, связан с внедрением значительных количеств трития в структурные элементы органов и тканей и, что особенно важно, непосредственно в ДНК.

Процессы инициации бластомогенеза при инкорпорации трития возникают не только в связи с ионизирующим действием β -частиц, но и в результате повреждений ДНК, связанных с изотопным эффектом. ОБЭ окиси трития по выходу злокачественных опухолей составляет 4,2, лейкозов — 2,5.

В табл. 5.35 приведены данные по коэффициентам ОБЭ НТО, как видно, по ряду показателей ОБЭ НТО колеблется от 1 до 4. Это свидетельствует о том, что биологическое действие трития, клиническая картина поражения этим изотопом имеют много общего с действием внешнего облучения. Однако следует указать, что при острой лучевой болезни, вызванной НТО, некоторые симптомы могут быть проявиться в более ранние сроки, чем при внешнем облучении (короче скрытый период, раньше наступают изменения со стороны крови, более ярко выражен геморрагический синдром).

Таким образом, биологическое действие трития во многом напоминает действие внешнего рентгеновского или γ -излучения. Однако есть и различия в реакции организма на однократное общее рентгеновское и γ -облучение в одинаковых по эффективности дозах α - и β -излучателей, введённых в организм. Так, при действии на животных рентгеновским и γ -излучениями циркуляторные расстройства возникают на 4–5-е, 7–12-е сутки, при введении в организм различных радионуклидов эта стадия удлиняется: при действии β -излучателей — до 12–15 суток, при введении α -излучателей — до 30–60 суток.

Имеется также различие в локализации и типе опухолей, вызванных рентгеновским и γ -излучением и введением равномерно распределяющихся β -излучателей. В первом случае, как правило, возникают злокачественные новообразования кожи, лейкозы, опухоли молочных желёз, во втором — развиваются преимущественно опухоли мягких тканей.

Несмотря на общие радиобиологические закономерности воздействия различных видов и источников ионизирующего излучения, для окиси трития имеются и характерные особенности, к которым относятся микрогеометрия распределения и высокая плотность ионизации. Эти специфические особенности в действии трития на организм позволяют считать его одним из эффективных радиоизотопов, обладающих политропным воздействием на различные органы и системы животных и человека. Сравнивая биологическое действие трития с другими γ - и β -излучателями (^{137}Cs , ^{106}Ru), которые имеют примерно такой же характер распределения, можно видеть, что биологическая эффективность трития значительно больше указанных γ -, β -излучателей. Относительно большая биологическая эффективность окиси трития объясняется тем, что в единице объёма ткани он создаёт в 10–30 раз большую плотность ионизации, чем рентгеновское и γ -излучение. Так, например, линейная потеря γ -излучения ^{226}Ra составляет $0,3 \text{ кэВ}/3,7 \cdot 10^4 \text{ Бк}$, трития — $5,5 \text{ кэВ}/3,7 \cdot 10^4 \text{ Бк}$.

Кроме того, необходимо учитывать, что при распаде трития образуется дочерний продукт гелий ($^3\text{He}_2$), который может приводить к разрыву связей

водорода ДНК и других структур, куда включается тритий. Это, в свою очередь, может вызвать генетические эффекты вследствие очень медленного обмена в ДНК. Изыскание эффективных средств для профилактики и терапии тритиевых поражений имеет важное практическое значение.

В. Ф. Журавлев [1966, 1968] в опытах на кроликах, поражённых окисью трития в дозе $1,48 \cdot 10^7$ Бк/г, использовал комплексную терапию. В состав комплекса входили: диуретин с водной нагрузкой, стимулятор кроветворения (кобальт с амидом никотиновой кислоты), аминазин, сыворотка Беленького, биомицин и поливитамины. Из 20 леченых кроликов выжило 17, в контрольной группе все животные погибли к 45-м суткам. Комплексная терапия способствовала более раннему восстановлению кроветворения: у животных меньше снижалась масса тела. Водная нагрузка и диуретин увеличивали выведение окиси трития с мочой. Средняя продолжительность жизни павших леченых кроликов составила 64,3 суток, из контрольной группы — 37,6 суток.

Хорошие результаты получены при использовании гомологичного глобулина при лечении крыс, поражённых окисью трития, который животным вводили однократно в дозе $2,22 \cdot 10^7$ Бк/г. Глобулин вводили подкожно через 2, 24 и 48 часов после поражения окисью трития. У леченых животных, по сравнению с «контрольными», средняя продолжительность жизни увеличивалась на 60 суток. А в отдалённые сроки у них значительно сокращался выход опухолей молочных желёз. Так, если при введении только окиси трития опухоли молочных желёз развивались в 66,6 % случаев, то при лечении глобулином их число снизилось до 30,4 % [Радиобиология инкорпорированных..., 2016].

Положительные результаты получены для профилактики тритиевых поражений. В опытах на крысах с введением окиси трития в дозе $2,22 \cdot 10^7$ Бк/г применяли вакцину БЦЖ однократно, за две недели до введения окиси трития, по 4 мг на крысу. Профилактическое введение вакцины БЦЖ в 5–10 раз снижает гибель животных в ранние сроки, удлиняет среднюю продолжительность жизни на 83 дня, снижает выход опухолей молочных желёз в отдалённые сроки на 32 %, по сравнению с крысами, получавшими только окись трития. Благоприятное влияние глобулина и вакцины БЦЖ на продолжительность жизни крыс и выход опухолей молочных желёз связано с ингибирующим действием аутоантител на процесс. Антитела создают детоксицирующий эффект, при канцерогенезе регулируют иммунодепрессию и оказывают десенсибилизирующее влияние.

В литературе описан случай лучевой болезни у человека после поступления в организм большого количества НТО. Больной стал отмечать общую слабость, быструю утомляемость, апатию, боли в полости рта при жевании.

Изменения в крови: Нв — 90 %, эр. — 4153000; цв. п. — 0,73; лейкоц. — 200; э — 8 %, п — 1 %, л — 75 %; мон — 10 %, плазм. кл. — 1 %, недифференц. кл. — 5%, РОЭ — 50 мм/ч. Свертываемость крови по Мас-Магро — 28 минут, кровоточивость по Дукке — 30 минут. Опустошение костного мозга. В моче определили $16,65 \cdot 10^{10}$ Бк/мл НТО.

Расчётные данные показали, что в организм поступило $35,15 \cdot 10^4$ Бк НТО [Радиобиология инкорпорированных..., 2016]. Доза внутреннего облучения за всё время составила 12 Зв. Период полувосстановления общего числа лейкоцитов и нейтрофилов — 32 и 39 суток соответственно. Для данного наблюдения характерно отсутствие первичной реакции, что часто наблюдается в эксперименте, и большая выраженность геморрагического синдрома. Примерно около 75 % всей

дозы облучения сформировалось в течение первых двух недель после попадания трития в организм. Причиной выраженного геморрагического синдрома являются: тотальное угнетение тромбоцитопоза и резкие изменения в сосудистой системе вследствие включения трития во все структурные элементы органов и тканей. Больной выздоровел [Радиобиология инкорпорированных..., 2016].

Существенную роль в обмене тритиевой воды (НТО) в организме играют легкие. Опыты на животных [Pinson, Langham, 1957] показали, что при вдыхании воздуха, содержащего пары НТО, в легких может всасываться от 85 до 100 % воды. Наблюдения на людях позволили установить, что 98–99 % вдыхаемого пара НТО всасывается через дыхательные пути и обменивается в организме. В атмосферный воздух выдыхается всего 1–2 % НТО.

Р. Осборн и А. Цовеарт [Osborne, Coveart, 1973] приводят данные, полученные на добровольцах, вдыхавших тритий в концентрации $1,85\text{--}18,5 \cdot 10^4$ Бк/л в течение 1,5–60 минут. У трёх человек, не пользовавшихся никакими средствами индивидуальной защиты, скорость поступления трития составила $54,76 \cdot 10^4$, $54,76 \cdot 10^4$ и $66,23 \cdot 10^4$ Бк/мин на каждые $3,7 \cdot 10^4$ Бк трития в 1 л воздуха [Радиобиология инкорпорированных..., 2016].

Материалы этих исследований свидетельствуют о том, что при оценке радиационной обстановки при работах с ^3H и решении вопросов защиты персонала необходимо учитывать возможность его поступления в организм не только через лёгкие, но и через кожу. Рассчитаны допустимые уровни загрязнения кожи человека НТО. В качестве временного ПДУ загрязнения кожи человека НТО рекомендовано $4,81 \cdot 10^7$ Бк на всё тело, или $2,66 \cdot 10^4$ Бк на 1 см^2 [Радиобиология инкорпорированных..., 2016].

Были рассчитаны ПДУ загрязнения кожи, Бк/см²: для базального слоя — $9,25 \cdot 10^3$; для всего тела — $5,55 \cdot 10^2$; для рук — $15,54 \cdot 10^3$. Одним из возможных путей поступления НТО в организм является также ЖКТ. В опытах с водой, меченой тритием (^3H), было установлено, что её всасывание из ЖКТ происходит очень быстро, начальный период происходит в желудке, однако основная масса её всасывается в тонком кишечнике. Так, у человека в течение 22–25 минут всасывается 1 л воды. У. Лангхам с коллегами [Langham] в опытах на людях показали, что после выпитой НТО в венозной крови тритий обнаруживается через 2–9 минут [Assay of tritium..., 1956]. Пик активности НТО в сыворотке крови и моче наблюдается через 20 минут после заглатывания. Всасывание НТО в кишечнике заканчивается через 40–45 минут, в последующее время (2,5 часа) его содержание в сыворотке крови держится на постоянном уровне. В опытах на крысах было установлено, что из тонкого кишечника НТО всасывается в 5 раз быстрее, чем из толстого.

3.2. Радиобиологические основы нормирования радиоактивных веществ. Пути и принципы переноса экспериментальных данных с животных на человека

Человек в процессе своей жизнедеятельности подвергается воздействию естественных и искусственных радионуклидов, солнечного и космического излучения. Проводимые испытания атомного оружия создают условия для глобального выпадения радионуклидов, что приводит к дополнительному лучевому воздействию на организм человека. В процессе производственной

деятельности значительный контингент людей может подвергаться облучению в дозе, значительно превышающей естественный фон. Определённые группы населения, проживающие вблизи промышленных объектов, АЭС, заводов по переработке ядерного горючего, различных энергетических установок и научно-исследовательских реакторов, могут также подвергаться воздействию излучения в дозе, превышающей природный уровень. Кроме того, ограниченные группы населения получают дополнительные лучевые нагрузки при различного рода диагностических и терапевтических процедурах с использованием внешних источников излучений и инкорпорированных радионуклидов [Foreman et al., 1958; Mays, 1976; Low level radiation..., 1998].

Для оценки допустимых или недопустимых уровней воздействия ионизирующего излучения на организм человека проводится большой комплекс исследований по изучению кинетики обмена, распределения, выведения, биологического действия различных радионуклидов и источников внешнего излучения. Особое внимание при этом уделяется пути и ритму поступления радионуклидов в организм, особенностям накопления, избирательности отложения в отдельных органах, их микрораспределению. Широкий комплекс экспериментальных исследований по обоснованию допустимых уровней воздействия составляет основу радиобиологического нормирования радиоактивных веществ.

Особую значимость приобретает перенос экспериментальных данных с животных на человека при разработке и обосновании ПДП различных радионуклидов в организм человека. Перед экспериментаторами стоит ответственная задача по выбору наиболее чувствительных показателей, с помощью которых можно выявить начальные признаки интоксикации при воздействии минимальных доз радиоактивных веществ с учетом индивидуальной чувствительности животных к действию различных радионуклидов. Однако выбор показателей и наиболее чувствительных животных не может дать полной информации для прямого переноса результатов эксперимента с животных на человека. В этом случае необходимо сопоставить различные физиологические функции животных с таковыми у человека. И только на основании этих материалов правомерно вводить определённые коэффициенты, которые в известной мере могут облегчить перенос экспериментальных данных с животного на человека.

В последнее время в литературе появились работы по этой важной и сложной проблеме, где авторы предлагают использовать сравнимые показатели для экстраполяции результатов экспериментальных исследований. Нам представляется, что использование сходных показателей ответной реакции организма животных и человека на воздействие радиоактивных веществ может служить основой для решения этих вопросов. При переносе данных с животных на человека необходимо учитывать ряд специфических биологических особенностей, присущих только человеку и требующих соответственного учёта.

Известно, что существуют различия в продолжительности жизни животных и человека, скорости течения обменных процессов, кинетике обновления клеточных популяций, реакции восстановления и репарации, чувствительности к воздействию различных физических и химических факторов, в том числе и к ионизирующему излучению [Гуськова, Байсоголов, 1971; Gastrointestinal..., 1993]. Экспериментаторов-токсикологов при переносе данных с животных на человека интересуют два вопроса: выбор адекватной модели для экспериментальных исследований и выяснение количественных соотношений в чувствительности животных

и человека к действию радионуклидов. При воздействии радионуклидов, помимо указанных факторов, следует учитывать особенности распределения и выведения вещества из организма, микрогеометрию распределения поглощённой дозы в органах и тканях, а также энергию, вид излучения, путь поступления и др. Всё это свидетельствует о значительных трудностях в разработке единых принципов подхода к переносу данных экспериментальных исследований с животных на человека.

Из литературных источников известно, что многие физиологические функции и патологические процессы у человека и животных имеют единые механизмы, поэтому основой для переноса данных с животных на человека является изучение общих закономерностей действия излучения на организм.

В качестве сравнимых показателей могут быть использованы следующие: продолжительность жизни, скорость прохождения пищи по ЖКТ, резорбция радиоактивных веществ из лёгких, скорость вентиляции легких животных и человека; сравнение степени поражения наиболее чувствительных органов (критических) у животных и человека. Весомое значение при оценке биологического эффекта радионуклида имеет индивидуальная чувствительность различных видов животных и человека, характеризующая специфику обменных процессов в организме. Известно, что наиболее резкие видовые различия у разных видов лабораторных животных связаны со скоростью протекания обменных процессов. Поэтому при переносе данных с животных на человека необходимо учитывать фактор времени. Следует сравнивать данные острой, подострой и хронической токсичности по кривым *доза — эффект*, чтобы определить изоэффективные количества изотопов в единицах активности для различных видов животных.

Нам известно, что человек по характеру реагирования на химические и радиоактивные вещества находится на одном уровне с наиболее чувствительными видами лабораторных животных. Различия могут заключаться лишь в глубине поражения и силе ответной реакции. При подходе к оценке токсичности того или иного радионуклида для обоснования допустимых уровней воздействия целесообразно определять чувствительность на разных лабораторных животных. Это может повысить точность и надежность переноса экспериментальных исследований с животных на человека. В литературе приводятся сведения о переносе данных с животных на человека при воздействии радиоактивных веществ.

Так, в опытах на крысах проводилось экспериментальное обоснование предельно допустимого содержания ^{32}P в организме человека и воздухе рабочих помещений [Бетенеков, 2014]. В качестве показателей использовались: летальный эффект, изменения в системе крови, в женской половой сфере и хрусталике. Показано, что эти показатели наиболее чувствительны к облучению и относятся к первой группе критических органов. Выбор показателей вполне оправдан, однако обоснование некоторых коэффициентов переноса весьма условно. Сравнивая продолжительность жизни человека и крысы, автором проводится аналогия, что 30 лет жизни человека соответствуют одному году жизни крысы, а на основании этого вносится коэффициент запаса — 2,5.

Авторы считают, что при переносе данных с животных на человека необходимо учитывать коэффициент запаса. При обосновании ПДК диурата аммония. Г. П. Галибин и П. А. Власов [1961] использовали различные клинико-физиологические показатели и на их основании устанавливали коэффициент

запаса. По их данным, для диураната аммония коэффициент запаса должен быть равен 7. При экстраполяции данных с животных на человека для обоснования коэффициента запаса окиси трития и газообразного трития удачно использованы коэффициенты перехода при сравнении периодов полувыведения изотопа, коэффициентов лёгочной вентиляции, продолжительности жизни.

Эти исследования ещё раз убедительно свидетельствуют о правомерности, переноса экспериментальных данных с животных на человека, так как характер ответной реакции на токсический агент и у животных, и у человека в основном однотипен. Различие заключается лишь в разной чувствительности человека и животных к воздействию изучаемого вещества. Для сравнения адекватных показателей вводят специальные коэффициенты перехода [Гуськова, Байсоголов, 1971; Gastrointestinal..., 1993]. Для установления подобных коэффициентов перехода нужна систематическая разработка научных принципов экстраполяции с рациональным и дифференциальным подходом в выборе информативных показателей.

Помимо коэффициентов перехода в токсикологии химических веществ при обосновании ПДК употребляют упоминаемый выше термин «коэффициент запаса». Известно, что в это понятие вкладывается уменьшение порога острого действия в 10 раз. Если яд обладает узкой зоной токсического действия или способностью к кумуляции, коэффициент запаса увеличивают. Иногда предлагают в качестве коэффициента запаса брать отношение LD_{100} к $LD_{50/30}$. При оценке биологического действия радиоактивных веществ такой подход к обоснованию коэффициента запаса будет неправильным. В конкретном случае необходимо, помимо острых эффектов, учитывать и отдалённые последствия поражений и вводить коэффициент запаса к минимально действующей дозе при однократном, а ещё лучше — при хроническом поступлении радионуклида в организм. Однако это положение может быть применимо не для всех радиоактивных веществ. Для радионуклидов с большим эффективным периодом полураспада, то есть когда минимальные дозы вызывают возникновение локализованных новообразований в отдалённые сроки, коэффициент запаса рассчитать крайне трудно. Кроме использования различных путей и принципов подхода к переносу данных с животных на человека, необходимо также учитывать и период полувосстановления нарушений функций. Периоды полувосстановления у разных видов животных и человека, как показали исследования Г. О. Дэвидсона [1960], различны. Таким образом, недостаточность информации по этим вопросам отражается в неопределённости так называемого коэффициента экстраполяции, то есть показателя, учитываемого в расчётах при переносе данных с животных на человека.

При выборе вида животных, близкого по своей чувствительности к человеку, кажется, что наиболее оправданно использование в опытах кошек, кроликов и собак. Однако анализ данных ряда исследований показывает, что для целого ряда токсических и радиоактивных веществ наиболее чувствительными являются мелкие животные, в ряде случаев — 2–3 вида животных. Это свидетельствует о том, что наиболее чувствительными в сравнительной характеристике токсичности различных веществ могут быть представители всех видов, хотя и имеется определённая тенденция, что чем крупнее животное, тем чаще оно обладает большей радиочувствительностью [Москалев, 1989].

Какие же принципы должны являться определяющими при выборе модели животного, наиболее близкого к человеку?

По данным Л. А. Тиунова [1967], в общем виде адекватной моделью можно считать животное, аналогичное человеку по клеточным структурам, биохимическим процессам обмена, особенно по характеру метаболизма изучаемого вещества. Оправданным является широкое использование в токсикологических исследованиях млекопитающих, так как они отвечают первым положениям этого принципа.

Таким образом, при переносе данных с животных на человека, в плане обоснования допустимых уровней воздействия, большое значение приобретают вопросы моделирования, лежащие в основе теории подобия, которая помогает вскрыть связь качественных и количественных сторон в явлениях одинаковой биологической природы.

В работе Ю. И. Москалева [1989] указывается, что для переноса данных с животных на человека по действию излучений в сравнительно высоких дозах, вызывающих острое лучевое заболевание, существенную роль играют сведения о кинетике обновления клеточных популяций в органах и тканях, особенно в кроветворной ткани и ЖКТ у различных млекопитающих, в том числе и человека, а также материалы о сравнительной радиочувствительности животных и относительной эффективности различных видов излучений.

При оценке последствий облучения в относительно малых дозах либо дозах, вызывающих хроническое течение поражения, критерием для переноса экспериментальных данных с животных на человека являются отдалённые последствия, особенно их опухолевые формы, развивающиеся в организме после воздействия излучения.

Литературные данные показывают, что уровни blastogenic доз для различных тканей у млекопитающих, в том числе у человека, близки или одинаковы, что свидетельствует о возможности прямого переноса экспериментальных исследований по blastogenic действию внешних источников излучения и инкорпорированных радиоактивных веществ с животных на человека и указывает на большую значимость сравнительных исследований по изучению отдалённых последствий поражения у различных видов лабораторных животных и человека [Бачинский, Светый, 2006; Радиационные поражения..., 2007].

Сравнивая отдельные физиологические функции организма животных и человека, используя различные показатели ранних и поздних реакций на лучевое воздействие, применяя соответствующие коэффициенты перехода, мы сможем с успехом переносить результаты экспериментальных исследований с животных на человека. Вместе с тем целый ряд вопросов этой проблемы до настоящего времени окончательно ещё не решён и подлежит дальнейшей разработке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уважаемый читатель, вот Вы и перевернули последнюю страницу нашей монографии. О чем она?

В монографии рассмотрены исторический концепт по животрепещущей проблеме, связанной с созданием и использованием трития — радиоактивного изотопа водорода, наиболее распространённого элемента как на Земном шаре, так и во Вселенной.

Кроме формального и смыслового анализа текста, в книге излагается идея последовательного синтеза и рассматриваются этапы становления мирного и военного использования атомной энергии как в СССР (позднее — в Российской Федерации), так и в мировом масштабе.

В представленной монографии рассмотрены наиболее значимые аспекты создаваемого тритием радиационного воздействия на окружающую среду и население, проживающее на территориях, находящихся в зоне влияния загрязнения тритием: Уральский, Сибирский и Дальневосточный федеральные округа и Республика Казахстан.

Кроме того, Республика Казахстан в данном контексте приведена отнюдь не случайно. До 1991 г. она входила в состав СССР, преемником которого стала Россия. И первый полигон по испытанию ядерного оружия был создан именно там. А с учётом того, что ветром осуществлялся перенос воздушных сред и пыли на территорию Сибирского региона, то актуально обобщение распространение трития воздушными, водными потоками.

Рассмотренные территории отличаются источниками поступления трития, следовательно, и механизмами воздействия на окружающую среду, особенно на среду обитания населения, проживающего в данных регионах.

В работе исследуется проблема изменения характеристик протекания взаимодействия трития с компонентами окружающей среды во временном континууме. Предложены оригинальные концепции по ассимиляции и трансформации трития, которые обусловлены не только изучаемым объектом, но и направлены на анализ и вскрытие содержания биохимических и физико-химических основ, происходящих в окружающей среде и живых организмах.

Особое внимание уделено потенциальному негативному воздействию трития на жизнеспособность живых организмов, в том числе млекопитающих. Окончательные выводы и заключения по этому поводу сделать достаточно проблематично, особенно, если рассматривать данный вопрос с точки зрения сочетанного воздействия физических (освещение, влажность, излучение) и химических факторов непосредственно тритийсодержащих соединений, которые могут быть органической и неорганической природы).

В качестве информационных материалов в монографии использованы литературные и собственные исследования, проводимые в натуральных и лабораторных условиях. В этом отношении предлагаемый материал может являться в какой-то степени универсальным. При необходимости приведённые

в работе результаты могут позволить дифференцированно анализировать текст под те задачи, которые могут стоять перед Вами, уважаемый читатель.

Хотелось бы сказать о том, что современная наука не стоит на месте. Возникают новые, ещё более актуальные мировые вызовы, которые не терпят промедления в своем решении. Приходят новые идеи, используется новейшее оборудование. В этой связи создаются условия для творчества и новых открытий, которые позволят ещё глубже понять природу действия трития на живые организмы как в целом, так и на клеточном уровне.

Мы, авторы монографии, очень надеемся на то, что наш труд будет полезен и время, ушедшее на его подготовку, потрачено не напрасно.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абукова, Л. А.* Гидрогеологические приоритеты экологически безопасного освоения нефтегазового потенциала Восточной Сибири / Л. А. Абукова, Ю. И. Яковлев, О. П. Абрамова // Бюл. Моск. о-ва испытателей природы. Отд-ние геол. Вып. 3. 2011. Т. 86. С. 54–62.
2. *Абукова, Л. А.* О захоронении радиоактивных и химических отходов в депрессионные водонапорные системы / Л. А. Абукова, Ю. И. Яковлев // Разведка и охрана недр. 2008. № 8. С. 82–84.
3. *Адушкин, В. В.* Подземные взрывы / В. В. Адушкин, А. А. Спивак. Москва : Наука, 2007. 579 с.
4. Активация системы репарации ДНК в тканях мышей, подвергнутых хроническому гамма-облучению / Я. К. Кожановская, Л. А. Фоменко, Н. П. Сирота, А. И. Газиева // Радиационная биология. Радиоэкология. Вып. 1. 1989. Т. 29. С. 8–12.
5. *Алексеев, С. В.* Криогидрогеологические системы Якутской алмазоносной провинции. Новосибирск : Гео, 2009. 319 с.
6. *Анциферов, А. С.* Гидрогеология древнейших нефтегазоносных толщ Сибирской платформы. Москва : Недра, 1989. 176 с.
7. *Анциферов, А. С.* Ресурсы уникальных хлоридных кальциевых рассолов Сибирской платформы и проблемы их промышленного освоения // Разведка и охрана недр. 2004. № 8–9. С. 30–32.
8. *Артамонова, С. Ю.* Радиоэкологическая обстановка в районе проведения мирного подземного взрыва «Кратон-3» в 1978 г. (Северо-Западная Якутия) // Химия в интересах устойчивого развития. 2012. Т. 20, № 2. С. 143–155. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17711851> (дата обращения: 14.01.2023).
9. Атлас геоэкологических карт на территории зоны наблюдения ФГУП ПО «Маяк». Озерск, 2007. 106 с.
10. *Бадаев, В. В.* Охрана окружающей среды при эксплуатации АЭС / В. В. Бадаев, Ю. А. Егоров, С. В. Казаков. Москва : Энергоатомиздат, 1990. 221 с.
11. *Бак, З.* Основы радиобиологии : перевод с англ. / З. Бак, П. Александер ; под редакцией Я. М. Варшавского, Э. Я. Граевского, М. Н. Мейселя. Москва : Иностран. лит., 1963. 500 с.
12. *Балонов, М. И.* Дозиметрия и нормирование трития. Москва : Энергоатомиздат, 1983. 152 с.
13. *Балонов, М. И.* Оценка дозы от поступления окиси трития в организм человека: роль включения трития в органическое вещество тканей / М. И. Балонов, Л. А. Чипига // Радиационная гигиена. 2016. Т. 9, № 4. С. 16–25. DOI:10.21514/1998-426X-2016-9-4-16-25.
14. *Беловодский, Л. Ф.* Тритий / Л. Ф. Беловодский, В. К. Гаева, В. И. Гришмановский. Москва : Энергоатомиздат, 1985. 248 с.
15. *Беловодский, Л. Ф.* Тритий. Москва : Энергоатомиздат, 1985. 212 с.
16. *Березин, С. А.* Бывший Семипалатинский испытательный полигон. Текущая ситуация и предстоящие планы в области нераспространения и ядерной безопасности // Материалы междунар. конф. «Ядерные технологии 21-го века

- и проблемы нераспространения» (7–9 октября 2015 г., Астана, Казахстан). 2015. С. 87.
17. *Бескrestнов, Н. В.* Опыт организации дозиметрического контроля за водоемом-охладителем АЭС / Н. В. Бескrestнов, А. Г. Фатькин, И. И. Колтик // Проблемы радиэкологии водоемов-охладителей атомных электростанций. Свердловск, 1978. 43 с.
 18. *Бетенеков, Н. Д.* Радиэкологический мониторинг : учебное пособие. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. 208 с.
 19. Биологические эффекты при поступлении радионуклидов внутрь организма. От радиобиологического эксперимента к человеку / Л. А. Булдаков, З. И. Калмыкова, Н. А. Кошурникова [и др.]. Москва : Атомиздат, 1976. С. 94–158.
 20. *Богданов, К. М.* Биофизические закономерности обмена тритиевой воды в организме / К. М. Богданов, Л. Л. Романовская. Москва : Энергоатомиздат, 1981. 137 с.
 21. Большая советская энциклопедия : в 51 томе. Т. 28 : Многоножки-Мятлик. Москва : Гос. науч. изд-во «Большая советская энциклопедия», 1954. С. 414
 22. *Бондарева, Л. Г.* Изучение влияния различных типов тушения на эффективность измерений трития в объектах окружающей среды / Л. Г. Бондарева, Н. В. Помозова // Журнал СФУ. Химия. 2009. Т. 2, № 1. С. 56–60.
 23. *Бондарева, Л. Г.* Исследования по накоплению трития водными организмами // Радиационная биология. Радиэкология. 2020. № 1. С. 83–88.
 24. *Бондарева, Л. Г.* Процессы ассимиляции трития водными растениями / Л. Г. Бондарева, М.А. Субботин // Радиационная биология. Радиэкология. 2016. № 4. С. 1–7.
 25. *Бурцев, И. С.* Радиационная обстановка в алмазоносных районах Якутии / И. С. Бурцев, Е. Н. Колодезникова. Якутск : ЯНЦ СО РАН, 1997. 52 с. URL: <https://yadi.sk/i/Kmp2f2-scGdTLw> (дата обращения: 14.01.2023).
 26. Влияние АЭС на радиэкологическое состояние водоема-охладителя / А. В. Трапезников, М. Я. Чеботина, В. Н. Трапезникова [и др.]. Екатеринбург : АкадемНаука, 2008. 400 с.
 27. Влияние радиоактивного загрязнения подземных вод на радиэкологическую обстановку бывшего Семипалатинского испытательного полигона : специальность 25.00.36 «Геоэкология» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук / Субботин Сергей Борисович. Москва, 2016. 23 с.
 28. Влияние факторов нерадиационной природы на кинетику обмена и биологическое действие окиси трития : специальность 03.00.01 «Радиобиология» : диссертация на соискание ученой степени кандидата медицинских наук / Цапков Михаил Михайлович. Обнинск : 1982. 206 с.
 29. *Вожов, В. И.* Гидрогеологические условия месторождений нефти и газа Сибирской платформы. Москва : Недра, 1987. 204 с.
 30. *Высоцкий, Е. Н.* Биосреда — живая вода организма. Донецк, 2010. 459 с.
 31. Выявление путей поступления трития в пресноводные организмы при эксплуатации горно-химического комбината / Т. Н. Лащенова, Л. Г. Бондарева, Н. Е. Федорова, В. Н. Ракитский // Гигиена и санитария. 2017. Т. 96, № 9. С. 844–848.

32. *Галибин, Г. П.* Обоснованию предельно допустимых концентраций диурата аммония в воздухе производственных помещений. Радиационная защита / Г. П. Галибин, П. А. Власов. Москва : Госатомиздат, 1961. С. 26–32.
33. Геохимическая специализация осадков (накипей) водных источников на примере двух регионов Сибири / А. Э. Тапхаева, Т. Т. Тапсаев, Л. П. Рихванов [и др.] // Сибирский радиоэкологический журнал. 2010. № 4. С. 685–696.
34. Геоэкологическая модель района мирного подземного ядерного взрыва «Кристалл» (Якутия) / С. Ю. Артамонова, Л. Г. Бондарева, Е. Ю. Антонов, Н. О. Кожевников // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2012. № 2. С. 143–158. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17699401> (дата обращения: 14.01.2023).
35. Гигиенические нормативы к обеспечению радиационной безопасности : приказ Министра здравоохранения Республики Казахстан от 02.08.2022 № ҚР ДСМ-71 // Информационно-правовая система нормативных правовых актов Республики Казахстан : [офиц. сайт]. 2022. URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V2200029012> (дата обращения: 14.01.2023).
36. Гидриды металлов / под редакцией В. Мюллера [и др.]. Москва : Атомиздат, 1973. 431 с.
37. Глобальные выпадения продуктов ядерных взрывов как фактор облучения человека / А. Н. Марей, Р. М. Бархударов, В. А. Книжников [и др.]. Москва : Атомиздат, 1980. 186 с.
38. Глубинное захоронение жидких радиоактивных отходов / А. И Рыбальченко, М. К. Пименов, П. П. Костин [и др.]. Москва : ИздАТ, 1994. 256 с.
39. *Голубов, Б. Н.* Миграция радионуклидов из полости подземного термоядерного взрыва «Кристалл» в алмазодобывающий карьер «Удачный» / Б. Н. Голубов, Ю. А. Сапожников, А. В. Горальчук // Радиационная безопасность Республики Саха (Якутия) : материалы II Республиканской научно-практ. конф. (Якутск, 2004 г.). Якутск, 2004. С. 182–192. URL: <https://disk.yandex.ru/i/FHfq-PGFGybsXA> (дата обращения: 14.01.2023).
40. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Республики Саха (Якутия) в 2002 году. Якутск, 2003. 43 с.
41. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Республики Саха (Якутия) в 2014 году. Якутск, 2015. 444 с.
42. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Республики Саха (Якутия) в 2020 году. Якутск, 2021. 677 с.
43. ГОСТ 31795–2012. Рыба, морепродукты и продукция из них. Метод определения массовой доли белка, жира, воды, фосфора, кальция и золы спектроскопией в ближней инфракрасной области = Fish, marine products and products of them. Method of determining the fraction of total mass of protein, fat, water, phosphorus, calcium and ash by the near-infra-red spectrometry : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 ноября 2012 г. № 1624-ст : дата введения 2013-07-01. Москва : Стандартинформ, 2013. 13 с.
44. *Гринева, Б. В.* Сцинтилляционные детекторы и системы контроля радиации на их основе / Б. В. Гринева, В. Д. Рыжиков, В. П. Семиноженко. Киев : Наукова думка, 2007. 445 с.

45. *Гришмановский, В. И.* Дозиметрический и радиометрический контроль. Москва : Энергоиздат, 1981. С. 176–188.
46. *Губанов, И. А.* Тростник обыкновенный, или южный // Иллюстрированный определитель растений Средней России : в 3 томах. Т. 1: Папоротники, хвощи, плауны, голосеменные, покрытосеменные (однодольные). Москва : Тов-во науч. изд. КМК, Ин-т технол. иссл., 2002. 285 с.
47. *Гуськова, А. К.* Лучевая болезнь человека / А. К. Гуськова, Г. Д. Байсоголов. Москва : Медгиз, 1971. 384 с.
48. *Данилов, В. А.* Радиометрическая съёмка на объектах подземных ядерных взрывов «Нева-2», «Нева-3» и «Скважина № 101» в Мирнинском районе РС(Я) // Радиационная безопасность Республики Саха (Якутия) : материалы II Республиканской науч.-практ. конф. Якутск, 2004. С. 262–268.
49. *Демин, С. Н.* Тритиевая проблема — гигиенические аспекты // Тритий — это опасно. Челябинск, 2001. С. 13–21.
50. *Десятов, Д. Д.* Оценка поступления трития в окружающую среду от выбросов АЭС / Д. Д. Десятов, А. А. Екидин // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2018. № 1 (21). С. 88–96.
51. Дозиметрический и радиометрический контроль при работе с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений : метод. руководство : в 2 томах. Т. 2: Индивидуальный контроль; Радиометрия проб / под общей редакцией В. И. Гришмановского. Москва : Энергоиздат, 1980. 204 с.
52. *Другов, Ю. С.* Пробоподготовка в экологическом анализе / Ю. С. Другов, А. А. Родин. Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. 855 с.
53. *Дудин, А. В.* Анализ аварий при обращении с тритием. Проект МНТЦ 1139, РФЯЦ-ВНИИЭФ. Саров, 2001.
54. *Дэвидсон, Г. О.* Биологические последствия общего гамма-облучения человека. Москва : Атомиздат, 1960. 108 с.
55. *Егоров, Ю. А.* О радиационной опасности трития, нарабатываемого на АЭС / ФГУП «Концерн Росэнергоатом». Москва, 2002.
56. *Екидин, А. А.* Оценка загрязнения атмосферы тритием при испарении воды с поверхности промышленных водоемов / А. А. Екидин, К. Л. Антонов, М. В. Жуковский // Вопросы радиационной безопасности. 2012. № 3. С. 3–10.
57. *Ентяков, Б. Н.* Создание производства трития в СССР // IHISM'14 JUNIOR : сборник докладов. Саров, 2017. URL: <http://book.sarov.ru/wp-content/uploads/2017/12/IHISM-14-3.pdf>.
58. *Ершов, А. В.* Проблемы качества подземных питьевых вод Калужской области на урбанизированных территориях и меры по их целенаправленному применению и улучшению / А. В. Ершов, И. И. Силин // Вестник новых медицинских технологий. 2005. Т. XII, № 3–4. С. 125–129.
59. *Жебендяев, А. И.* Токсикологическая химия : учебное пособие : 2 частях. Ч. 2 / М-во здравоохранения Республики Беларусь, Витебский гос. мед. ун-т. Витебск, 2015. 415 с.
60. *Журавлёв, В. Ф.* Биологическое действие окиси трития при хроническом поступлении в организм // Распределение и биологическое действие изотопов / под редакцией Ю. И. Москалёва. Москва : Атомиздат, 1966. С. 188–196.
61. *Журавлёв, В. Ф.* Влияние модифицирующих факторов на распределение и биологическое действие окиси трития // Проблемы нормирования

- ионизирующих излучений в условиях воздействия модифицирующих факторов. Москва, 1991. С. 295–300.
62. Журавлёв, В. Ф. Кинетика обмена газообразного трития / В. Ф. Журавлёв, Н. С. Калязина // Гигиена и санитария. 1974. № 6. С. 113–114.
 63. Журавлёв, В. Ф. Токсикология радиоактивных веществ. Москва : Энергоатомиздат, 1990. 336 с.
 64. Журавлёв, В. Ф. Токсичность и клиническая картина поражения окисью трития различных видов животных. Окись трития / под редакцией Ю. И. Москалёва. Москва : Атомиздат, 1968. С. 175–197.
 65. Журавлёв, В. Ф. Токсичность окиси трития в эксперименте. Распределение, биологическое действие и ускорение выведения радиоактивных изотопов / под редакцией Ю. И. Москалёва. Москва : Медицина, 1964. С. 202–209.
 66. Журавлёв, В. Ф. Экстраполяция данных с животных на человека при оценке допустимых уровней воздействия газообразного трития / В. Ф. Журавлёв, Н. С. Калязина, К. С. Калугин // От радиобиологического эксперимента к человеку / под редакцией Ю. И. Москалёва. Москва, 1976. С. 146–150.
 67. Загрязнение компонентов наземных экосистем ^3H , ^{90}Sr , ^{137}Cs и ^{226}Ra в результате нарушения многобарьерной защиты хранилищ радиоактивных отходов : специальность 03.00.01 «Радиобиология» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Латынова Наталья Евгеньевна. Обнинск, 2009. 153 с.
 68. Закономерности пространственного распределения ^{90}Sr и ^{137}Cs в пойменных ландшафтах реки Теча / П. М. Стукалов, А. И. Смагин, В. И. Рерих, В. С. Каргаполов // Вестник НЯЦ РК: Радиоэкология. Охрана окружающей среды. Вып. 3. 2004. С. 26–31.
 69. Закономерности распределения и миграции радионуклидов в долине реки Енисей / Ф. В. Сухоруков, А. Г. Дегерменджи, В. М. Белолипецкий [и др.]. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2004. 286 с.
 70. Иваницкая, М. В. Источники поступления трития в окружающую среду / М. В. Иваницкая, А. И. Малофеева // Тритий — это опасно. Челябинск, 2001. С. 22–29.
 71. Ивахнюк, Г. К. Перспективы увеличения глобальной радиационной нагрузки от техногенного трития / Г. К. Ивахнюк, М. А. Пименова, А. Р. Сай // и национальная стратегии управления рисками катастроф и стихийных бедствий : сборник трудов. Москва, 2015. С. 263–264.
 72. Инкорпорирование трития культурами перца и баклажана при кратковременном воздействии окиси трития / Е. Н. Поливкина, Е. С. Сысоева, Е. В. Романенко [и др.] // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 4. С. 97–105.
 73. Инкорпорирование трития культурой *Helianthus annuus* при корневом поступлении / Е. Н. Поливкина, О. Н. Ляхова, Н. В. Ларионова, Л. Ф. Субботина // Вестник НЯЦ РК. Вып. 1. 2021. С. 48–52.
 74. Использование модели воздушного переноса атмосферных примесей для оценки влияния ПО «Маяк» на населенные пункты / В. А. Чудин, Н. И. Чувашев, Е. Л. Мурашова [и др.] // Проблемы радиоэкологии и пограничных величин. Екатеринбург, 2005. С. 410–422.
 75. Исследование выноса трития водотоками с территории Красноярского ГХК / А. В. Носов, А. М. Мартынова, В. Ф. Шабанов [и др.] // Атомная энергия. 2001. Т. 90, № 1. С. 77–80.

76. Исследование наработки трития и гелия в литийсодержащих материалах и их выделения / Ж. А. Заурбекова, А. А. Ситников, Т. В. Кульсартов [и др.] // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. Вып. 4. 2018. Т. 41. С. 14–25.
77. Исследование содержания трития в объектах окружающей среды на территории испытательной площадки «Дегелен» / О. Н. Ляхова, С. Н. Лукашенко, М. А. Умаров, А. О. Айдарханов // Вестник НЯЦ РК. Вып. 4. 2007. С. 80–86.
78. Исследование содержания трития в снежном покрове в местах проведения подземных ядерных взрывов / Д. В. Турченко, С. Н. Лукашенко, А. О. Айдарханов [и др.] // Радиационная биология. Радиоэкология. 2018. Т. 58, № 2. С. 174–182.
79. Исследование уровня и характера распределения трития в воздушной среде на территории СИП : специальность 03.01.01 «Радиобиология» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Ляхова Оксана Николаевна. Обнинск, 2013. 23 с.
80. Исследования и разработки в области безопасности тритиевых технологий / Л. Ф. Беловодский, В. Г. Киселёв, М. С. Панюшкин, Л. К. Поротников // Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами: IHISM'19 JUNIOR : сборник докладов Тринадцатой Междунар. школы молодых учёных и специалистов им. А.А. Курдюмова / под редакцией доктора технических наук А. А. Юхимчука. Саров : РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2020. С. 287–318.
81. Источники и эффекты ионизирующего излучения: отчёт Научного комитета ООН по действию атомной радиации 2000 г. на Генеральной Ассамблее ООН : [с научными приложениями] : пер. с англ. / под редакцией акад. РАМН Л. А. Ильина и проф. С. П. Ярмоненко. Москва : РАДЕКОН, 2002. Т. II: Эффекты (Ч. 4). 320 с.
82. К проблеме нормирования радиоактивного загрязнения водных экосистем в зоне АЭС / А. Л. Кононович, И. В. Молчанова, А. В. Трапезников [и др.] // Экология. 1988. № 4. С. 29–34.
83. *Калистратова, В. С.* Метаболизм и биологическое действие соединений трития (история вопроса и современное состояние проблемы) / В. С. Калистратова, О. А. Кочетков, Д. И. Кабанов // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2014. Т. 59, № 2. С. 54–67.
84. *Калистратова, В. С.* Особенности биологического действия инкорпорированных радионуклидов. Радиационная медицина. Руководство для врачей-исследователей и организаторов здравоохранения : в 4 т. Т. 1 / под редакцией Л. А. Ильина. Москва : ИздАт, 2004. С. 604–613.
85. *Капица, П. Л.* Энергия и физика // Вестник АН СССР. 1976. № 1. С. 34–43.
86. Карта-схема объектов ГХК в Железногорске // Zheleznogorsk. URL: <http://www.tipazheleznogorsk.narod.ru/ghkmap.html> (дата обращения: 20.02.2023).
87. *Карцев, А. А.* Связь аномально низких пластовых давлений с рифтогенными зонами Сибири / А. А. Карцев, В. М. Матусевич, Ю. И. Яковлев // Геотектоника. 1989. № 2. С. 86–88.
88. Качество воды. Определение объёмной активности трития. Метод подсчёта сцинтилляций в жидкой среде. Международный стандарт ISO 9698:2010. Астана : КазИнСт, 2010. 32 с.

89. Качество воды. Применение масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Часть 2: Определение 62 элементов : СТБ ИСО 17294-2. Минск : Госстандарт, 2007. 21 с.
90. *Климовский, И. В.* Криолитозона Якутской алмазоносной провинции / И. В. Климовский, С. П. Готовцев. Новосибирск : ВО Наука, 1994. 168 с.
91. *Ковалев, В. К.* Опытные-методические работы по измерению плотности потока радона близ ПЯВ на Среднеботуобинском НГКМ) / В. К. Ковалев, Б. Н. Ложников // Радиационная безопасность Республики Саха (Якутия): материалы II Республиканской науч.-практ. конф. Якутск, 2004. С. 274–283.
92. Концептуальная модель и многолетние результаты радиозоологического мониторинга зоны влияния жидких сбросов Белоярской атомной электростанции / Михайловская Л. Н., А. В. Коржавин, В. Н. Трапезникова, А. В. Трапезников // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. 2020. № 3. С. 68–75.
93. *Королев, В. Г.* Генетические эффекты распада инкорпорированного трития / В. Г. Королев, Е. А. Иванов // Экологические аспекты исследований водоемов-охладителей АЭС. Москва, 1983. С. 145–150.
94. *Кособрухов, А. А.* Активность фотосинтетического аппарата при периодическом повышении CO₂ // Физиология растений. 2009. Т. 56, № 1. С. 8–16.
95. *Красной, Дж.* Радиохимическая характеристика бетона регулярной и высокой плотности из выведенного из эксплуатации реактора // Управление отходами. 1993. Т. 13, № 2. С. 131–141.
96. *Кривохатский, А. С.* Радиохимия ядерных взрывов // Радиохимия. 1982. № 3. С. 277–286.
97. *Крышев, И. И.* Радиозоологическая обстановка в биосфере и реальность ее оптимизации / И. И. Крышев, Т. Г. Сазыкина // Биосфера. 2009. Т. 1, № 2. С. 203–212.
98. *Кузин, А. М.* Радиационная биохимия. Москва, 1962.
99. *Кучин, С. П.* Подписка о неразглашении: документально-историческое повествование о строительстве подземного горно-химического комбината на территории Красноярского края / С. П. Кучин, С. А. Федотов, А. А. Зимин. Красноярск : Буква, 2006. 367 с.
100. *Ленский, Л. А.* Физика и химия трития. Москва : Энергоиздат, 1981. 113 с.
101. *Ленченко, В. Г.* Санитарно-гигиенический очерк реки Пышмы и Белоярского водохранилища / В. Г. Ленченко, Л. А. Сажина, Е. В. Шилкова // Материалы XIII научной сессии Свердловского НИИ гигиены труда и профпатологии. Свердловск, 1964. С. 102–106.
102. *Ливанцова, С. Ю.* Техногенный тритий в окружающей среде / С. Ю. Ливанцова, В. В. Снакин // Жизнь Земли. 2014. Т. 35–36. С. 261–269. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29855647> (дата обращения: 14.01.2023).
103. *Ломоносов, И. И.* Измерение трития / И. И. Ломоносов, Л. Д. Сошин. Москва : Атомиздат, 1968. 110 с.
104. *Лукашенко, С. Н.* Радиозоологическое состояние на Семипалатинском испытательном полигоне. Современное состояние // Проблемы биогеохимии и геохимической экологии. 2010. № 3. С. 5–10.
105. *Лукашенко, С. Н.* Инновационный патент РК № 29721. Установка для извлечения воды из образцов / С. Н. Лукашенко, Н. В. Ларионова, В. П. Зарембо.

- Астана, 2015. Бюл. № 4. URL: <http://kzpatents.com/4-ip29721-ustrojstvo-dlyaizvlecheniyavody-iz-obrazcov.html> (дата обращения: 14.01.2023).
106. Лукьяненко, В. И. Общая ихтиология. Москва : Текстиль и пищевая промышленность, 1983. 320 с.
 107. 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. № 4 (32). С. 80.
 108. Ляхова, О. Н. Исследование содержания трития в почве в местах проведения ядерных испытаний на территории СИИ / О. Н. Ляхова, С. Н. Лукашенко, А. О. Айдарханов // Современные проблемы загрязнения почв : сборник материалов IV Междунар. науч. конф. 27–31 мая 2013 г. Москва : МТУ, 2013. С. 140–143.
 109. Ляхова, О. Н. Исследование уровней и характера загрязнения тритием воздушной среды экосистем штолен с водопроявлениями / О. Н. Ляхова, С. Н. Лукашенко, Н. В. Ларионова // Тяжёлые металлы и радионуклиды в окружающей среде : материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. (4–7 февраля 2010 г.). Семей, 2010. Т. II. С. 314–318.
 110. Ляхова, О. Н. К вопросу о путях миграции трития за пределы бывшей испытательной площадки «Дегелен» / О. Н. Ляхова, Н. В. Ларионова, С. Н. Лукашенко // Радиация и риск. 2014. Т. 23, № 1. С. 97–105.
 111. Ляхова, О. Н. Механизмы формирования тритиевого загрязнения воздушного бассейна в пределах горного массива Дегелен / О. Н. Ляхова, С. Н. Лукашенко, Н. В. Ларионова // Сборник трудов Института радиационной безопасности и экологии за 2007–2009 гг. Вып. 2. Павлодар : Дом печати, 2010. С. 331–354.
 112. Маковский, В. И. Аккумулятивная роль Ольховского болота в зоне воздействия Белоярской АЭС / В. И. Маковский, М. Г. Нифонтова, Н. Н. Новгородцева // Влияние Ольховского болота на экологическое состояние района расположения Белоярской АЭС. Екатеринбург, 1991. С. 3–24.
 113. Махонько, К. Обобщенные данные о радиоактивном загрязнении объектов природной среды / К. Махонько, В. Ким, Е. Козлова // Бюллетень по атомной энергии. 2001. № 10. С. 26–43.
 114. Международное руководство по методам расчёта основных гидрологических характеристик. Ленинград : Гидрометеоздат, 1984. 247 с.
 115. Методические рекомендации по санитарному контролю за содержанием радиоактивных веществ в объектах внешней среды / М-во здравоохранения СССР. Москва, 1980. С. 95–97.
 116. Методические указания. Тритий и его соединения. Контроль величины индивидуальной эффективной дозы внутреннего облучения при поступлении в организм человека [МУ 2.6.1.15-02]. 2002. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293836/4293836115.pdf> (дата обращения: 14.01.2023).
 117. Методы измерения трития. Рекомендации Национального комитета по радиационной защите и измерениям США / перевод с английского М. И. Рохлина и Г. М. Рохлина ; под редакцией Ю. В. Сивинцева. Москва : Атомиздат, 1978. 94 с.
 118. Миграция радионуклидов в пресноводных и наземных экосистемах : в 2 томах. Т. 2 / А. В. Трапезников, И. В. Молчанова, Е. Н. Караваева, В. Н. Трапезникова. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2007. 400 с.

119. *Микуленко, К. И.* Геолого-географические условия проведения и последствия подземных ядерных взрывов на территории Республика Саха (Якутия) / К. И. Микуленко, А. И. Чомчоев, С. П. Готовцев. Якутск : Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2006. 196 с.
120. *Микуленко, К. И.* Оценка возможного влияния подземных ядерных взрывов мирного назначения на радиоактивность подземных пород по данным гамма-каротажа на Среднеботуобинском месторождении / К. И. Микуленко, И. В. Буйдылло // Радиационная безопасность Республики Саха (Якутия): материалы II Республиканской науч.-практ. конф. Якутск, 2004. С. 268–274.
121. Мирные ядерные взрывы: обеспечение общей и радиационной безопасности при их проведении / коллектив авторов под руководством профессора В. А. Логачева. Москва : ИздАТ, 2001. 512 с.
122. Моделирование кинетики и механизма вымывания окиси трития из атмосферы осадками / А. Ю. Алейников, Л. Ф. Беловодский, А. В. Голубев [и др.] // Потенциал Российских ядерных центров и МНТЦ в тритиевых технологиях РРИТТ99, Саров 17–21 мая 1999 г. : сборник докладов междунар. конф. Саров, 2000. С. 171.
123. Моделирование реэмиграции НТО из почвы в атмосферу в окрестности постоянно действующего источника трития / Л. Ф. Беловодский, А. Н. Верещага, А. В. Голубев [и др.] // Потенциал российских ядерных центров в тритиевых технологиях. Саров : ВНИИЭФ, 2000. С. 155.
124. *Мокров, Ю. Г.* Реконструкция и прогноз радиоактивного загрязнения реки Теча : в 2 частях. Ч. 1 : Роль взвешенных частиц в процессе формирования радиоактивного загрязнения реки Теча в 1949–1951 гг. // Библиотека журнала «Вопросы радиационной безопасности». 2002а. № 1. С. 170–172.
125. *Мокров, Ю. Г.* Реконструкция и прогноз радиоактивного загрязнения реки Теча : в 2 частях. Ч. 2 : Реконструкция радиационной обстановки и оценка дозы облучения населения прибрежных районов р. Теча за период 1949–1954 гг. // Библиотека журнала «Вопросы радиационной безопасности». 2002б. № 2. С. 141–142.
126. Молекулярная биология клетки : перевод с английского ; в 3 томах. Т. 2 / Б. Албертс, Д. Брей, Дж. Льюис [и др.]. 2-е изд. перераб. и доп. Москва : Мир, 1993. 539 с.
127. *Молчанова, И. В.* Итоги многолетних радиоэкологических исследований природных экосистем в зоне жидких сбросов Белоярской атомной электростанции / И. В. Молчанова, Е. Н. Караваева, Л. Н. Михайловская // Вопросы радиационной безопасности. 2009. № 4. С. 19–27.
128. *Молчанова, И. В.* Некоторые итоги радиоэкологического изучения природных экосистем в районе Белоярской АЭС / И. В. Молчанова, Е. Н. Караваева, Н. В. Куликов // Экология. 1985. № 5. С. 30–34.
129. *Момот, О. А.* Оценка риска для здоровья при употреблении питьевой воды, содержащей малые количества трития / О. А. Момот, Б. И. Сынзыныс // Вестник Калужского университета. 2017. № 2 (35). С. 96–100.
130. Мониторинг аварийных объектов МПЯВ «Кратон-3», «Кристалл» после проведенных реабилитационных мероприятий / В. В. Касаткин, В. А., Ильичев, К. В. Мясников [и др.] // Радиационная безопасность Республики Саха (Якутия) : материалы II Республиканской науч.-практ. конф. Якутск, 2004.

- С. 82–100. URL: <https://disk.yandex.ru/i/YsNny0da9zzKCQ> (дата обращения: 14.01.2023).
131. Мониторинг трития в природных водах СССР (России) : специальность 25.00.36 «Геоэкология» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора географических наук / Катрич Иван Юрьевич. Обнинск, 2009. 42 с.
 132. *Морозов, П. В.* Первые годы ГХК. Железногорск : Горно-химический комбинат, 2006. 100 с.
 133. *Морозов, П. В.* Скала. Горно-химический комбинат, 1950–2010 / П. В. Морозов, Б. В. Рыженков. Железногорск : [б. и.], 2010. 174 с.
 134. *Москалев, Ю. И.* Радиобиологический эксперимент и человек / под редакцией Ю. И. Москалева. Москва : Атомиздат, 1976. С. 236–253.
 135. *Москалев, Ю. И.* Радиобиология инкорпорированных радионуклидов. Москва : Энергоатомиздат, 1989. 264 с.
 136. *Мурзина, Л. Д.* Динамика клеток в лимфоидных органах при длительном введении окиси трития в разных количествах / Л. Д. Мурзина, К. Н. Муксинова // Радиобиология. Вып. 3. 1982. Т. 22. С. 365–368.
 137. Нефтегазовая гидрогеология юга Сибирской платформы / А. С. Анциферов, А. С. Артеменко, О. В. Зехова [и др.]. Москва : Недра, 1984. 192 с.
 138. *Нифонтова, М. Г.* ^{90}Sr и ^{137}Cs в торфяных отложениях низинного болота в зоне влияния Белоярской АЭС / М. Г. Нифонтова, В. И. Маковский, Н. В. Куликов // Экология. 1986. № 3. С. 30–35.
 139. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. Москва : Федер. центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. 2009. 100 с.
 140. О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов : постановление Правительства РФ № 1069 от 19.10.2012 // Правительство России : офиц. сайт. URL: <http://government.ru/docs/all/84641/> (дата обращения: 14.01.2023).
 141. Обеспечение радиационной безопасности на территории Республики Казахстан. Мероприятие 1. Обеспечение безопасности бывшего Семипалатинского испытательного полигона : отчёт РБП 011 (информационный, годовой), по договору № 17-2009 от 26.06.2009 / ИРБЭ НЯЦ РК; рук. Лукашенко С.Н. Курчатов, 2009. 164 с. Инв. № О-768.
 142. Окись трития / под редакцией Ю. И. Москалева. 1968. 396 с.
 143. Определение поглощённой дозы при дистанционной лучевой терапии / Международное агентство по атомной энергии. Вена, 2004. 269 с. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TRS398r_web.pdf.
 144. Особенности радиационной обстановки на Урале / В. И. Уткин, М. Я. Чеботина, А. В. Евстигнеев, Н. М. Любашевский. Екатеринбург : УрО РАН, 2004. 150 с.
 145. Отчёт о научно-технической деятельности Института радиационной безопасности и экологии НЯЦ РК, выполненный в рамках мероприятия 0346 «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан» за 2009 год : отчёт по научно-технической программе (годовой) / ИРБЭ НЯЦ РК; рук. Лукашенко С. Н. Курчатов, 2009. 82 с.

146. Паницкий, А. В. Характер перераспределения радионуклидов в системе вода — почва в экосистемах, сопряжённых с радиоактивно загрязненными водотоками из штолен, на испытательной площадке «Дегелен» Семипалатинского испытательного полигона / А. В. Паницкий, С. Н. Лукашенко // Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра. Радиация и риск. 2013. № 4. С 75–82.
147. Петрянов-Соколов, И. Самое необыкновенное вещество. Москва : Мир, 1965. 107 с.
148. Поливкина, Е. Н. Оценка аэрального поглощения НТО культурой *Helianthus Annuus* в условиях Семипалатинского испытательного полигона / Е. Н. Поливкина, Н. В. Ларионова, О. Н. Ляхова // Радиация и риск, 2020. № 1. С. 79–89.
149. Поляков, В. А. Методика использования трития окружающей среды при гидрогеологических и геоэкологических исследованиях подземных вод / В. А. Поляков, Н. В. Пятницкий // Разведка и охрана недр. 2011. № 8. С. 39–44.
150. Пособие по определению расчётных гидрологических характеристик. Ленинград : Гидрометеиздат, 1984. 448 с.
151. Поступление трития от БАЭС в водные экосистемы / М. Я. Чеботина, А. П. Кулигин, Т. А. Реч [и др.] // Безопасность эксплуатации Белоярской АЭС. Екатеринбург : УрО РАН, 1994. С. 187–191.
152. Правдин, И. Ф. Руководство по изучению рыб. Москва : Пищевая пром-сть, 1966. 376 с.
153. Привезенцев, Ю. А. Рыбоводство / Ю. А. Привезенцев, В. А. Власов. Москва : Мир, 2004. 456 с.
154. Проблема накопления, детектирования и контроля за тритием в жидкосолевых реакторах : [публичные слушания Комиссии по ядерному регулированию (NRC) США] / Д. Грабаскас [и др.] ; Аргоннская национальная лаборатория. 2020. 20 авг.
155. Проведение комплекса научно-технических и инженерных работ по приведению бывшего Семипалатинского испытательного полигона в безопасное состояние : в 3 томах. Т. 1 / Н. А. Назарбаев, В. С. Школьник, Э. Г. Батырбеков [и др.]. Курчатов, 2016. 312 с.
156. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 1999 г.: ежегодник / под редакцией К. П. Махонько. Санкт-Петербург : Росгидромет, 2001. 330 с.
157. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2016 г.: ежегодник / ФГБУ НПО «Тайфун». Обнинск, 2017. 398 с.
158. Радиационные и радиоэкологические последствия выбросов трития в атмосферу: аналитический обзор / Л. Ф. Беловодский, В. Г. Киселев, М. С. Панюшкин, А. С. Хапов // Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами: IHISM'15 Junior. Саров, 2016. С. 208–223.
159. Радиационные поражения человека: Избранные клинические лекции : методическое пособие / А. В. Барабанова, А. Е. Баранов, А. Ю. Бушманов, А. К. Гуськова ; под редакцией А. Ю. Бушманова, В. Д. Ревы. Москва : Слово, 2007. 171 с.
160. Радиоактивная загрязнённость почвенно-растительного покрова на территории и окрестностях бывшего рабочего посёлка на «Кратоне-3» / А. Д. Гедеев, Ю. В. Булатенков, В. Ю. Шкроев // Радиационная

- безопасность Республики Саха (Якутия) : материалы II Республиканской науч.-практ. конф. Якутск, 2004. С. 168–180.
161. Радиобиология инкорпорированных радионуклидов / В. С. Калистратова, И. К. Беляев, Е. С. Жорова [и др.] ; под ред. В. С. Калистратовой. 2-е изд., перераб. Москва : ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2016. 556 с.
 162. Радиоэкологическая обстановка в регионах расположения предприятий Росатома / под общей редакцией И. И. Линге и И. И. Крышева. Москва : САМ полиграфист, 2015. 296 с.
 163. Радиоэкология почвенно-растительного покрова / Н. В. Куликов, Н. В. Молчанова, В. А. Книжников [и др.]. Свердловск, 1990. 169 с.
 164. Разработка и применение метода оценки загрязнения тритием грунтовых вод по его содержанию в растительном покрове / Н. В. Ларионова, С. Н. Лукашенко, О. Н. Ляхова [и др.] // Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана : сборник трудов Института радиационной безопасности и экологии за 2007–2009 гг. Вып. 2. Павлодар : Дом печати, 2010. С. 321–330.
 165. *Ракитский, В. Н.* Научное обоснование закономерностей и механизмов антропогенного воздействия на биоценоз пресноводной экосистемы / В. Н. Ракитский, Л. Г. Бондарева, Н. Е. Федорова. Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2020. 236 с.
 166. *Ракитский, В. Н.* Расчёт дозы облучения для некоторых компонентов пищевой цепочки пресноводной экосистемы реки Енисей в период деятельности предприятия ядерно-топливного цикла Горно-химического комбината, г. Красноярск / В. Н. Ракитский, Л. Г. Бондарева, Н. Е. Федорова // Радиационная гигиена. 2018. Т. 11, № 3. С. 75–82.
 167. Распределение ^{90}Sr и ^{137}Cs по компонентам болотно-речной экосистемы / И. В. Молчанова, Е. Н. Караваева, М. Я. Чеботина, Н. В. Куликов // Экология. 1982. № 2. С. 45–49.
 168. Распределение трития в почве на территории «Атомного» озера Семипалатинского испытательного полигона / Л. В. Тимонова, О. Н. Ляхова, С. Н. Лукашенко [и др.] // Почвоведение. 2020. № 3. С. 358–365.
 169. Результаты исследования радиоактивности почв объектов «Кристалл» и «Кратон-3» / А. Д. Геденов, И. Н. Кулешова, Л. П. Бакушкина [и др.] // Радиационное загрязнение территории Республики Саха (Якутия): проблемы радиационной безопасности : материалы I Республ. науч.-практ. конф. Якутск, 1993. С. 214–232.
 170. *Рихванов, Л. П.* Радиоактивные элементы в окружающей среде и проблемы радиоэкологии : учебное пособие. Томск: STT, 2009. 430 с.
 171. *Рыженков, Б.* Подгорный штурм: [К 55-летию Горного управления] / Б. Рыженков, Е. Агеева // Сегодняшняя газета — Красноярск-26. 2006. 24 августа. С. 12.
 172. *Сабанеев, Л. П.* Жизнь и ловля пресноводных рыб. 7-е изд., стер. Киев : Урожай, 1994. 608 с.
 173. *Садовников, В. И.* Современное состояние и пути решения проблем Теченского каскада водоемов / В. И. Садовников, Ю. В. Глаголенко, Е. Г. Дрожко // Вопросы радиационной безопасности. 2002. № 1. С. 3–14.
 174. Санитарные правила работы с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений (№ 333-60). Москва : Госиздат, 1960. 118 с.

175. Светый, Л. И. Радиационные поражения : учебно-методическое пособие / Л. И. Светый, О. Н. Бачинский. Курск, 2006. 160 с.
176. Семипалатинский испытательный полигон. Современное состояние. Изд. 3-е, перераб. и доп. Павлодар : Дом печати, 2017. 52 с.
177. Семипалатинский испытательный полигон. Современное состояние : научно-популярное издание / С. Н. Лукашенко, Ю. Г. Стрельчук, С. Б. Субботин [и др.] ; редактор С. Н. Лукашенко. Изд. 2-е. Павлодар : Дом печати, 2011. 48 с.
178. Смагин, А. И. Экология водоёмов в зоне техногенной радионуклидной геохимической аномалии на Южном Урале. Челябинск : ИЦ ЮУрГУ, 2013. 205 с.
179. Смагин, А. И. Экология промышленных водоемов предприятия ядерного топливного цикла на Южном Урале. Озерск : РИЦ ВРБ, 2007. 190 с.
180. Соглашение о создании Международной организации ИТЭР по термоядерной энергии для совместной реализации проекта ИТЭР и Соглашения о привилегиях и иммунитетах Международной организации ИТЭР по термоядерной энергии для совместной реализации проекта ИТЭР. 2007. URL: http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?doc_itself=&collection=1&nd=203001772&page=1&rdk=0&link_id=61#10 (дата обращения: 02.02.2023).
181. Состав, свойства и уровень радиоактивного загрязнения почвенного покрова 15-километровой зоны Белоярской АЭС / И. В. Молчанова, С. Ю. Кайгородова, Л. Н. Михайловская [и др.] // Журнал Сиб. федер. ун-та. 2016. № 9. С. 321–337.
182. Сравнительная оценка бластомогенного эффекта хронического действия окиси трития и внешнего облучения // В. С. Ревина, В. С. Воронин, В. К. Лемберт, В. В. Суходоев // Радиобиология. Вып. 5. 1984. Т. 24. С. 697–700.
183. Стукалов, П. М. Радиоактивное загрязнение поверхностных водных систем района расположения предприятия ФГУП «ПО Маяк» / П. М. Стукалов, А. И. Алексахин, И. А. Иванов // Официальный сайт Всероссийского НИИ технической физики. 2011. URL: www.vniitf.ru/downloads/miass/present_ppt/wed/stukalov.ppt (дата обращения: 14.11.2022).
184. Стукалов, П. М. Радиоактивное загрязнение промышленного водоёма ПО «Маяк» Старое болото. Обзор результатов исследовательских работ (1949–2006 годы). Часть 1 / Библиотека журнала «Вопросы радиационной безопасности». Озерск : РИЦ ВРБ, 2007. № 10. 136 с.
185. Субботин, С. Б. Исследование миграции трития с подземными водами на бывшем Семипалатинском полигоне / С. Б. Субботин, А. О. Айдарханов, Ю. В. Дубасов // Радиохимия. 2013. Т. 55, № 5. С. 471–478.
186. Субботин, С. Б. Оценка возможностей протекания процессов катастрофического характера на площадке «Балапан» / под рук. С. Н. Лукашенко. Павлодар : Дом печати, 2010. . Вып. 2. С. 401.
187. Сцинтилляционный метод в радиометрии / В. О. Вяземский, И. И. Ломоносов, А. Н. Писаревский [и др.]. Москва : Госатомиздат, 1961. 430 с.
188. Сыса, А. Г. Радиационная эпидемиология и гигиена / А. Г. Сыса, Н. М. Новикова, Е. Г. Бусько. Минск : МГЭИ имени А.Д. Сахарова БГУ, 2017. Электрон. дан. (4,6 МБ). 1 электрон. опт. диск (DVD). Текст : электронный.

189. *Телушкина, Е. Л.* Тритий во внешней среде вблизи предприятий ядерно-топливного цикла // Гигиена и санитария. 1983. № 3. С. 62–65.
190. *Титаева, Н. А.* Ядерная геохимия: учебное пособие. Москва : Изд-во МГУ, 2000. 336 с.
191. *Туунов, Л. А.* Общие вопросы промышленной токсикологии. Москва, 1967. С. 55–67.
192. Тритий в воде колодцев и скважин района производственного объединения «Маяк» / М. Я. Чеботина, О. А. Николин, А. И. Смагин [и др.] // Уральский геофизический вестник. 2007. № 4. С. 95–97.
193. Тритий в водоёмах производственного и комплексного назначения в районе ПО «Маяк» на Урале / М. Я. Чеботина, О. А. Николин, А. И. Смагин, Е. Л. Мурашова // Водное хозяйство России. 2011. № 4. С. 75–84.
194. Тритий в моче людей в зоне влияния Белоярской АЭС / М. Я. Чеботина, О. А. Николин, Л. Г. Бондарева, В.Н. Ракитский // Радиационная гигиена. 2016. Т. 9, № 4. С. 87–92.
195. Тритий в окружающей среде Игналинской АЭС / И. Мажейка, Р. Петрошос, Р. Ясюленис, Р. Ширвайтис // Атомная энергия. 1993. Т. 75, № 6. С. 471.
196. Тритий и его соединения. Контроль величины индивидуальной эффективной дозы. 15-02 / М-во РФ по атомной энергии, М-во здравоохранения РФ. Москва, 2004. 27 с.
197. Тритий и ЖСР // AtomInfo.Ru : [электронное издание]. 2020. URL: <http://www.atominfo.ru/newsz02/a0128.htm> (дата обращения: 10.02.2023).
198. Тритий от молекулы до биосферы. 1. Закономерности поведения в окружающей среде / Е. В. Антонова, К. Л. Антонов, М. Е. Васянович, С. В. Панченко // Экология. 2022. № 4. С. 255–288.
199. Тритиевый технологический комплекс экспериментального токамака с сильным полем / В. К. Капышев, И. А. Давыдова, И. А. Ионесян [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. Вып. 1. 2000. С. 3–11.
200. *Усачев, В. Д.* Тритий в промышленных водоемах ПО «Маяк» // Тритий — это опасно. Челябинск, 2001. С. 41–56.
201. *Уткин, В. И.* Газовое дыхание земли // Соросовский образовательный журнал. 1997. С. 57–64.
202. *Хайн, Дж.* Радиационная дозиметрия / Дж. Хайн, Г. Браунелл. Москва : Иностран. лит., 1958. 758 с.
203. Химическое загрязнение почв и их охрана. Словарь-справочник / В. С. Орлов, М. С. Малинина, Г. В. Матузова [и др.]. Москва : Атомиздат, 1991. 303 с.
204. *Храмченкова, О. М.* Основы радиобиологии : учебное пособие. Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2003. 238 с.
205. Цитогенетическое обследование профессионалов-атомщиков, подвергавшихся хроническому воздействию β -излучения трития / Г. П. Снигирева, Т. И. Хаймович, А. Н. Богомазова [и др.] // Радиационная биология. Радиозэкология. 2009. Т. 49, № 1. С. 60–67.
206. *Чацис, Р.* Что такое термоядерный синтез и почему его так сложно запустить? / Р. Чацис, М. Барбарини // Международное агентство по атомной энергии : [офиц. сайт]. URL: <https://www.iaea.org/ru/energiya-termoyadernogo-sinteza/chto-takoe-termoyadernyy-sintez-i-pochemu-ego-tak-slozhno-zapustit> (дата обращения: 10.02.2023).

207. Чеботина, М. Я. Миграция трития от предприятий ядерного технологического цикла в источники питьевого водоснабжения на Урале / М. Я. Чеботина, О. А. Николин // Водное хозяйство России. 2013. № 4. С. 90–100.
208. Чеботина, М. Я. Планктон и его роль в миграции радионуклидов в водоем-охладителе АЭС / М. Я. Чеботина, В. П. Гусева., А. В. Трапезников. Екатеринбург : УрО РАН, 2002. 168 с.
209. Чеботина, М. Я. Поступление трития из водоёма-охладителя в источники питьевого водоснабжения путём фильтрации через глубинные слои подстилающих пород // ДАН. 2011. Т. 438, № 5. С. 675–677.
210. Чеботина, М. Я. Поступление трития на земную поверхность с дождевыми осадками / М. Я. Чеботина, О. А. Николин, Е. Л. Мурашова // Водное хозяйство России. 2012. № 5. С. 76–87.
211. Чеботина, М. Я. Радиоэкологические исследования трития в Уральском регионе / М. Я. Чеботина, О. А. Николин. Екатеринбург : УрО РАН, 2005. 90 с.
212. Чеботина, М. Я. Тритий в водоёмах района расположения ПО «Маяк» / М. Я. Чеботина, О. А. Николин, А. И. Смагин // Вопросы радиационной безопасности. 2005. № 1. С. 79–84.
213. Чеботина, М. Я. Современные уровни концентраций трития в моче людей в зоне предприятий ядерно-топливного цикла / М. Я. Чеботина, О. А. Николин // ДАН. 2012. Т. 447. № 6. С. 691–692.
214. Чеботина, М. Я. Современные уровни концентраций трития в промышленных водоёмах ФГУП ПО «Маяк» / М. Я. Чеботина, О. А. Николин, Е. Л. Мурашова // Вопросы радиационной безопасности. 2010. № 4. С. 55–58.
215. Чеботина, М. Я. Тритий в зоне Белоярской АЭС / М. Я. Чеботина, Т. А. Реч, Н. В. Куликов // Экология. 1990. № 2. С. 34–39.
216. Чеботина, М. Я. Тритий в источниках питьевого водоснабжения жителей района ПО «Маяк» / М. Я. Чеботина, О. А. Николин, А. И. Смагин // Вопросы радиационной безопасности. 2008. № 2. С. 82–86.
217. Чеботина, М. Я. Тритий в снеговом покрове в зонах воздействия предприятий ядерно-топливного цикла на Урале / М. Я. Чеботина, О. А. Николин, А. И. Смагин // Водное хозяйство России. № 2. 2014. С. 102–113.
218. Чуйков, Ю. С. Объект «Вега» и последствия ядерных взрывов в мирных целях (обзор) / Ю. С. Чуйков, Г. Г. Досмухамедова // Астраханский вестник экологического образования. 2006. № 1–2 (8–9). С. 46–71.
219. Чевычелов, А. П. Радиоактивное загрязнение мерзлотных почв ^{137}Cs и ^{90}Sr продуктами аварийного подземного ядерного взрыва / А. П. Чевычелов, П. И. Собакин, И. В. Молчанова // Почвоведение. 2006. № 12. С. 1512–1519.
220. Чиркова, В. Г. О методах концентрирования при измерении трития в природных водах // Труды Ин-та экспериментальной метеорологии. 1947. Вып. 3 (42). С. 105.
221. Шестаков, Ю. Г. Математические методы в геологии : учебное пособие. Красноярск, 1988. 54 с.
222. Шрам, Э. Органические сцинтилляционные детекторы / Э. Шрам, Р. Ломбер. Москва : Атомиздат, 1967. 183 с.
223. Эванс, Э. Тритий и его соединения / перевод с английского И. Б. Бравермана [и др.]. Москва : Атомиздат, 1970. 311 с.
224. Эйдис, Л. Х. Основы радиационной биологии / Л. Х. Эйдис, В. И. Корогодин, А. М. Кузин ; под редакцией чл.-корр. АН СССР А. М. Кузина и д-ра биол.

- наук Н. И. Шапиро ; Акад. наук СССР ; Ин-т биол. физики. Москва : Наука, 1964. 404 с.
225. Экологические проблемы урбанизированных территорий в районах размещения предприятий атомной промышленности на примере Обнинского региона / О. В. Старков, В. И. Вайзер, Н. Г. Богданович [и др.] // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2003. № 2. С. 67–72.
 226. Юхимчук, А. А. Тритиевая наука и технологии в России // Химическая промышленность сегодня. 2019. № 3. С. 40–47.
 227. Ядерное оружие // Министерство обороны Российской Федерации : интернет-портал. URL: <https://encyclopedia.mil.ru/encyclopedia/dictionary/details.htm?id=13205@morfDictionary> (дата обращения: 02.02.2023).
 228. Яковлев, Ю. И. Гидродинамическое обоснование выделения водонапорных систем депрессионного типа / Ю. И. Яковлев, Р. Г. Семашев // Геология нефти и газа. 1982. № 9. С. 23–27.
 229. Якушкина, Н. И. Физиология растений : учебник / Н. И. Якушкина, Е. Ю. Бахтина. Москва : ВЛАДОС, 2004. 484 с.
 230. Янкаускас, А. Б. Влияние трития на морфо-анатомическую структуру растений вида Тростник обыкновенный (*Phragmites australis*) / А. Б. Янкаускас, Н. В. Ларионова, А. Н. Шатров // Радиация и риск. 2021. Т. 30, № 2. С. 133–145.
 231. Янов, А. Ю. Тритий в окружающей среде Уральского региона: обзор современного состояния и анализ перспектив изучения с позиций радиологической защиты / А. Ю. Янов, В. В. Востротин, Л. В. Финашов // Человек. Спорт. Медицина. 2016. Т. 16, № 2. С. 85–99.
 232. Ярушина, М. И. Видовой состав и экологическая характеристика водорослей водоема-охладителя Белоярской АЭС / М. И. Ярушина, В. П. Гусева, М. Я. Чеботина // Экология. 2003. № 1. С. 23–29.
 233. A Catalogue of Spectra for the Calibration of Dose Meters, Rep. GSF-560 / W.W. Seelantag, W. Panzer, G. Drexler [et al.] // Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung, Braunschweig. 1979.
 234. A Data Base for Tritium Level around a Chronic Source / D. Galeriu, N. Paunescu, N. Mocanu, A. Melintescu // Report WP3 IDSPANAP 58-03/2003.
 235. A Method of Calibration for Measurement of Low-Level Tritium in Environmental Water using a Liquid Scintillation Counter / S. Fukutani, M. Fukui, A. Akio Koyama, K. Nishimaki // J. Nuclear Science and Technology. 2008. No. 6. P. 89–92.
 236. An updated review on tritium in the environment / F. Erolle, L. Ducros, L. D. Séverine [et al.] // J. Environmental Radioactivity. 2018. Vol. 181. P. 128–137. DOI:10.1016/j.jenvrad.2017.11.001.
 237. Annual Report of the Environmental Radioactivity around Nuclear Power Plants in Fukui, Japan / FERC edit. 1999. No. 31 (5). P. 172–189.
 238. Applying direct liquid scintillation counting to low level tritium measurement / C. Varlam, I. Stefanescu, O. G. Dului [et al.] // Applied Radiation and Isotopes. 2009. No. 67. P. 812–816.
 239. Assay of tritium activity in body fluids with use of a liquid scintillation system / W. H. Langham, W. J. Eversole, F. N. Hayes, T. T. Trujillo // J. Lab. clin. Med. 1956. No. 47. P. 819–825.
 240. Assessment of the tritium distribution in the vegetation cover in the areas of underground nuclear explosions at the Semipalatinsk test site / Y. N. Polivkina,

- N. V. Larionova, O. N. Lyakhova [et al.] // *J. Environmental Radioactivity*. 2021. Vol. 237. P. 106705.
241. *Balonov, M. I.* Exchange kinetics and dosimetry of tritium oxide in man for different routes of administration / M. I. Balonov, E. I. Dolgirev, I. A. Likhtarev // *Health Physics*. 1974. Vol. 27, No. 4. P. 367–375.
 242. *Baumgartner, F.* Distribution of tritium between water and exchangeable hydrogen bridges of biomolecules / F. Baumgartner, Ch. Kardinal, G. Mullen / *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 2001. Vol. 249, No. 2. P. 513–517.
 243. *Baumgartner, F.* A Tritium — protium fractionation near and inside DNA / F. Baumgartner, M. Kim // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 2000. Vol. 243, No. 2. P. 295–298.
 244. *Bolsunovsky, A. Ya.* Tritium in surface waters of the Yenisei River basin / A. Ya. Bolsunovsky, L. G. Bondareva // *J. Environ. Radioactivity*, 2003. Vol. 3, No. 66. P. 285–294.
 245. *Bondareva, L.* Accumulation and retention of tritium (tritiated water) in larva fish (*Carassius gibelio*) and radiotoxicological effect // *Open Access J. Toxicology*. 2017. Vol. 2, Iss. 1. P. 1–6.
 246. *Bondareva, L.* Investigation of the tritium content in surface water, bottom sediments (zoobenthos), macrophytes, and fish in the mid-stream region of the Yenisei River (Siberia, Russia) / L. Bondareva, M. K. Schultz // *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2015. No. 22 (22). P. 18127–18136.
 247. *Bondareva, L.* Natural occurrence of tritium in the ecosystem of the Yenisei River // *Fusion Science and Technology*. 2011. Vol. 60, No. 4. P. 1304–1307.
 248. *Bondareva, L.* The Interaction of Tritium with Some Types of Aquatic Plants / L. Bondareva, M. Chebotina, M. Subbotin // *Jacobs J. of Aquaculture and Res.* 2015. No. 2 (1). P. 11–18.
 249. *Bondareva, L. G.* Tritium content of some components of the middle Yenisei ecosystem // *Radiochemistry*. 2015. Vol. 57, Is. 5. P. 557–563.
 250. *Bondareva, L.* Tritium in the freshwater ecosystem of the Yenisei River: behavior, accumulation, and transformation // *Tritium: Advance in Research and Application* / by ed. Jankovic. New York : Nova Science Publishers, Inc., 2018. P. 47–98.
 251. *Brown, R. M.* The measurement of tritium in Canadian food items // Report AECL-CRNL/INFO-0499 AECL Project. 1995. No. 3.135.1.
 252. *Butler, H. L.* Observation of Biological Half-Life of Tritium / H. L. Butler, J. H. Leroy // *Health Physics*. 1965. Vol. 11. P. 283–285.
 253. *Chebotina, M. Y.* Tritium in water systems of Ural region / M. Y. Chebotina, O. A. Nicolin // *Radiation risk estimates in normal and emergency situations* / A. A. Cigna, M. Durante. Dordrecht : Springer, 2006. P. 187–196.
 254. *Cohen, L. K.* Environmental tritium studies at a PWR power plant / L. K., Cohen T. J. Kneip // *Tritium* / Eds. A. A. Moghissi, M.W. Carter. 1973. P. 632.
 255. Contamination mechanisms of air basin with tritium in venues of underground nuclear explosions at the former Semipalatinsk test site / O. N. Lyakhova, S. N. Lukashenko, N. V. Larionova [et al.] // *J. Environmental Radioactivity*. 2012. Vol. 113. P. 98–107. DOI:10.1016/j.jenvrad.2012.02.010.
 256. Conversion rate of HTO to OBT in plants / M. Atarashi-Andoh, H. Amano, M. Ichimasa, Y. Ichimasa // *Fusion Sci. Techn.*, 2002. Vol. 41, No. 3. P. 427–431.

257. *Corcoran, V. J.* Decontamination and Decommissioning of UK Tritium Facilities // V. J. Corcoran, C. A. Campbell, P. B. Bothwell // *Fusion Technology*. 2017. 21:2P2. P. 727–732. DOI:10.13182/FST92-A29834.
258. *Crawford, T. V.* Savannah River Laboratory environmental transport and effects research / Du de Nemours (E.I.) and Co. Aiken, SC (USA) // Annual report. 1976, May. 1977. P. 35–37.
259. Determination of the baseline tritium concentrations (HTO, TFWT and OBT) in soil and plants in Ontario, Canada / S. B. Kim, M. Bredlaw, H. Rousselle [et al.] // *Environ. Radioact.* 2022. Vol. 243. P. 106810.
260. Determination of Total Tritium in Urine from Residents Living in the Vicinity of Nuclear Power Plants in Qinshan China / Shen Bao-Ming, Ji Yan-Qin, Tian Qing [et al.] // *Int. J. Environ Res Public Health*. 2015. Vol. 12 (1). P. 888–894.
261. Developments of gaseous water, hydrogen and methane sampling system for environmental tritium monitoring / T. Uda, T. Sugiyama [et al.] // *Fusion Engineering and Design*. 2006. No. 81. P. 1385–1390.
262. Environmental monitoring in the vicinity of the Savannah River Plant / Du Pont de Nemours (E.I.) and Co., Aiken, SC (USA) // Annual report. 1975. P. 45.
263. Emergency response to spill of tritiated heavy water — the interface between emergency response, routine monitoring and research / D. R. Champ, R. M. Brown, E. L. Cooper [et al.]. Vienna : IAEA, 1990. 657 p.
264. *Evans, A. G.* New does estimates from chronic tritium exposure // *Health Phys.* 1969. Vol. 16. P. 57–68.
265. *Evance, A. G.* Environmental aspects of a tritium release from the Savannah River Plant on March 23, 1983 / A. G. Evance, D. D. Hoel, M. V. Kantelo ; Du Pont de Nemours (E.I.) and Co., Aiken, SC (USA) ; Savannah River Lab. 1985. Jan. 148 p.
266. *Foreman, H.* Clinical experience with radioactive materials / H. Foreman, W. Moss, B. C. Bustler // *Am. J. Roentgenol. Radium Therapy Nucl. Med.* 1958. No. 79. P. 1071–1079.
267. Further study on fallout ³H ingestion n in Akita, Japan / S. Hisamatsu, Y. Takizawa, T. Katsumata [et al.] // *Health Phys.* 1989. Vol. 57, No. 4. P. 565–570.
268. *Garland, J. A.* Incorporation of tritium in grain plants / J. A. Garland, M. Ameen // *Health Phys.* 1979. Vol. 36. P. 35–38.
269. *Garland, J. A.* The absorption of tritium gas by English soils, plants and the sea / J. A. Garland, L. C. Cox // *Water Air Soil Pollut.* 1982. Vol. 17. P. 207–211.
270. *Garston, A. L.* Tritium in the environment // *Adv. Radiat. Biol.* 1979. Vol. 8. P. 419.
271. Gastrointestinal absorption and retention of polonium in adult and newborn rats and guinea pigs / J. W. Haines, G.P.L. Naylor, H. Pottinger, J. D. Harrison // *J. Radiat. Biol.* 1993. No. 64. P. 127–132.
272. Genetic effects of radiation (Annex A). Genetic and somatic effects of ionizing radiation. New York : United Nations, 1986. P. 165–262.
273. Handbook for assessment of the exposure of biota to ionising radiation from radionuclides in the environment / ed. by J. Brown, P. Strand, Al. Hosseini // Project within the EC 5th Framework Programme, Contract № FIGE-CT-2000–00102. Framework for Assessment of Environmental Impact. 2003.
274. *Harrison, J. D.* Uncertainties in dose and coefficients for intakes of tritiated water and organically bound forms of members of the public / J. D. Harrison, A. Khursheed, B. E. Lambert // *Radiation Protection Dosimetry*. 2002. Vol. 98, No. 3. P. 299–311.

275. ^3He mass spectrometry for very low-level measurement of organic tritium in environmental samples / P. Jean-Baptiste, E. Fourré, A. Dapoignya [et al.] // *J. Environmental Radioactivity*. 2010. Vol. 101, Iss. 2. P. 185–190.
276. *Henry, P.* Etude d'une contamination accidentelle par l'eau tritiée // Symposium on assessment of radioactive organ and body burdens : proc. of the International Atomic Energy Agency meeting (1971 November 22, Stockholm, Vienna). 1972. P. 641–57.
277. *Hill, R. L.* Metabolism and dosimetry of tritium / R. L. Hill, J. R. Johnson // *Health Physics*. 1993. No. 65. P. 628–647.
278. *Horowitz, C. T.* The content of scandium, thorium, silver, and other trace in different plant species / C. T. Horowitz, H. H. Schock, L. A. Horowitz-Kisimova // *Plant Soil*. 1974. Vol. 40. P. 397–403.
279. *Huguet, M.* Main feature implemented in the JET facility for D-T operations / M. Huguet, F. Bertolini // *J. Fus. Technol.* 1986. Vol. 10, No. 3, Pt. 2B. P. 1386–1587.
280. Hui-fang, Sh. Study of ratio of tritium concentration in plants water to tritium concentration in air moisture for chronic atmospheric release of tritium / Sh. Hui-fang, Y. Ren-tai // *Energy Procedia*. 2011. No. 52. P. 421–2425.
281. ICRP Publication 136: Dose Coefficients for Non-human Biota Environmentally Exposed to Radiation // *Ann ICRP*. 2017. No. 46 (2). P. 1–136.
282. IRIS/HEAST // United States Environmental Protection Agency. 2016. URL: <https://cfpub.epa.gov/ncea/iris/search/index> (accessed: 27.02.2023).
283. IRSN. Radionuclide fact sheet: Tritium and the environment. 2012. URL: <https://www.irsn.fr/EN/Research/publications-documentation/radionuclides-sheets/environment/Pages/Tritium-environment.aspx> (accessed: 27.02.2023).
284. *Jones, W. M.* Vapor pressures of tritium oxide and deuterium oxide. Interpretation of isotope effect // *J. Chem. Phys.* 1968. Vol. 48. P. 207.
285. *Kim, D. J.* Tritium speciation in nuclear decommissioning materials : Doctoral Thesis. 2009. 196 p. URL: <http://eprints.soton.ac.uk/id/eprint/72145> (accessed: 02.02.2023).
286. *Kim D. J.* Tritium Speciation in Nuclear Reactor Bioshield Concrete and its Impact on Accurate Analysis / D. J. Kim, P. E. Warwick, I. W. Croudace // *Analytical Chemistry*. 2008. Vol. 80 (14). P. 5476–5480. <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ac8002787>.
287. *Kim, S.* Current understanding of organically bound tritium (OBT) in the environment / S. Kim, N. Baglan, P. Davis // *J. Environmental Radioactivity*. 2013. Vol. 126. P. 83–91. DOI:10.1016/j.jenvrad.2013.07.011.
288. *Kim, S.-B.* Investigation into tritium behavior in Chinese cabbage and Rice after a short-term exposure of HTO // S.-B. Kim, M.-H. Lee, G.-S. Choi // *J. Korean Asso. Radiat. Prot.* 1998. Vol. 23, No. 2. P. 75–82.
289. Kinetics of dose distribution in structural layers of skin contaminated with radioactive materials / D. P. Osanov, E. B. Ershov, O. V. Klickov, V. A. Rackova // *Health Phys.* 1971. Vol. 20, No. 6. P. 559–566.
290. *Kirchmann, R.* Transfer and incorporation of tritium into the constituents of grass and milk under natural conditions / R. Kirchmann, van den J. Hoek, A. Lafontaine // *Health Phys.* 1971. No. 21 (1). P. 61–6. DOI:10.1097/00004032-197107000-00009.

291. *Kotzer, T.* Dosimetric implications of atmospheric dispersal of tritium near a heavy-water research reactor facility // T. Kotzer, T. Trivedi // *Radiat. Prot. Dosimetry*. 2001. No. 9. P. 61–66.
292. *Lambert, B. E.* An accidental intake of tritiated water / B. E. Lambert, H. B. Sharpe, K. B. Dawson // *Am Ind Hyg Assoc. J.* 1971. Vol. 32 (10). P. 682–686.
293. *Laul, J. C.* A Biogeochemical distribution of rare earths and other trace elements in plants and soils / J. C. Laul, W. C. Weimer, L. Rancitelli // *Origin and Distribution of the Elements* / ed. L. H. Ahrens. 1979. Vol. 11. P. 819–827.
294. *Lin, R.* Tritium profiles of pore water in the Chinese loess unsaturated zone: Implications for estimation of groundwater recharge / R. Lin, K. Wei // *J. Hydrology*. 2006. Vol. 328, Is. 1–2. P. 192–199.
295. *Low level radiation health effects: compiling the data* / ed. J. Muckerheide // *Radiation, Science, & Health*, Needham. 1998. 409 p.
296. *Lyakhova, O. N.* Tritium as an indicator of venues for nuclear tests // *J. Environmental Radioactivity*. 2013. Vol. 124. P. 13–21.
297. *Lu, W.* Computer vision for solid waste sorting: A critical review of academic research // W. Lu, J. Chen. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X9390005H> (accessed: 14.01.2023).
298. *Mass spectrometry: Innovation and application* / by ed. Wilfried M. A. Niessen. Elsevier, 2004. Vol. 3. 357 p.
299. *Mays, Ch. W.* International Atomic Energy Agency “Biological and Environmental Effects of Low-level Radiation” (Chicago, 3–7 Nov. 1975). Vienna, 1976. Vol. 11. P. 373–380.
300. *McCubbin, D.* Incorporation of organic tritium (^3H) by marine organisms and sediment in the Severn estuary // Bristol channel (UK). *Mar Pollut Bull.* 2001. Vol. 42, No. 10. P. 852–863.
301. *McFarlane, J. C.* Tritium fractionation in plants // *Environ. Exp. Bot.* 1976. Vol. 16. P. 9–14.
302. *Melintescu, A.* Uncertainty of current understanding regarding OBT formation in plants / A. Melintescu, D. Galeriu // *J. Environmental Radioactivity*. 2017. Vol. 167. P. 134–149. DOI:10.1016/j.jenvrad.2016.11.026.
303. *Melintescu, A.* Dynamic model for tritium transfer in an aquatic food chain / A. Melintescu, D. Galeriu // *Radiation and Environmental Biophysics*. 2011. No. 50. P. 459–473.
304. *Migration of plutonium in ground water at the Nevada test site* / A. B. Kersting, D. W. Efur, D. L. Finnegan [et al.] // *Nature*. 1999. Vol. 397. P. 56–59.
305. *Minder, W.* Internal contamination with tritium // *Strahlentherapie*. 1969. Vol. 137, No. 6. P. 700–704.
306. *Moghissi, A. A.* Further studies on the long-term evaluation of the biological half-life of tritium / A. A. Mogissi, M. W. Carter, E. W. Bretthauer // *Health Phys.* 1972. Vol. 23, No. 6. P. 805–806.
307. *Moghissi, A. A.* Long-term evaluation of the biological half-Life of tritium / A. A. Mogissi, M. W. Carter, R. Liberman // *Health Phys.* 1971. Vol. 21. P. 57.
308. *Momot, O.* Pollution of ground sources of drinking water with technogenic tritium / O. Momot, B. Synzynys, G. Kozmin // *Dangerous Pollutants (Henobiotics) in Urban Water Cycle*. Dordrecht : Springer, 2008. P. 331–340.

309. *Murphy, C. E.* Tritium Transport and Cycling in the Environment // Health Phys. 1993. Vol. 65. P. 6683–6697.
310. *Murphy, C. E.* Tritium Transport around nuclear facilities / C. E. Murphy, C. W. Sweet, R. D. Fallon // Nucl. Saf. 1999. No. 23 (6). P. 677–684.
311. NCRP. Report No. 109 — Effects of Ionizing Radiation on Aquatic Organisms. 1991. URL: <https://ncrponline.org/shop/reports/report-no-109-effects-of-ionizing-radiation-on-aquatic-organisms-1991/> (accessed: 12.02.2023).
312. *Nishikawa, M.* Study on Permeation Behavior of Gaseous Tritium through Concrete Walls / M. Nishikawa, K. Furuichi, H. Takata // Fusion Science and Technology. 2006. No. 50 (4). P. 521–527. DOI:10.13182/FST06-A1275.
313. *Okada, S.* Overview of tritium: characteristics, sources, and problems / S. Okada, N. Momoshimat // Health Phys. 1993. Vol. 65 (6). P. 595–609.
314. Ontario drinking water advisory council, Report and Advice on the Ontario drinking water Quality standard for tritium, ODWAC, Toronto, May 21, 2009 // CANDU heavy water reactors generate more tritium than U.S. light reactors. URL: http://www.odwac.gov.on.ca/reports/052109_ODWAC_Tritium_Report.pdf.
315. Organically bound tritium formation and translocation in crop plants, modelling and experimental results / S. Strack, S. Diabat, J. Muller, W. Raskob // Fusion Techn. 1995. No. 28. P. 951–956.
316. *Osborne, R. V.* A portable monitor for tritium in air / R. V. Osborne, A. S. Coveart // Nucl. Instrum. and Methods. 1973. No. 106 (1). P. 181–198.
317. Packard Instrument Company, Tri-Carb Liquid Scintillation Analyzers: Models 2100TR/2300TR : Operations Manual. 1995.
318. *Park, J. W.* Processing of surimi and surimi seafood, Marine Freshwater Products / J. W. Park, T. C. Lanier ; ed. M. Handbook, R. E. Lancaster. 2000.
319. Perkin Elmer, LSC Cocktail Development and Evolution. 2000a.
320. Perkin Elmer, Sample Preparation & Liquid Scintillation Counting. 2000b.
321. *Pinson, E. A.* Physiology and toxicology of tritium in man / E. A. Pinson, W. H. Langham // J. Applied Physiology. 1957. Vol. 10, No. 1. P. 108–126.
322. *Pointurier, F.* Determination of organically bound tritium background level in biological samples from a wide area in the southwest of France / F. Pointurier, N. Baglan, G. Alanic // J. Environ. Radioactiv. 2003. Vol. 68. P. 171–189.
323. Principles of fusion energy / A. A. Harms, K. F. Schoepf, G. H. Miley, D. R. Kingdon // Introduction to Fusion Energy for Students of Science and Engineering / World Scientific Publishing Company. 2000. P. 8–11.
324. *Puhakainen, M.* Tritium in urine in Finnish people / M. Puhakainen, T. Heikkinen // Radiat. Prot. Dosimetry. 2008. Vol. 128. P. 254–257.
325. Radioactive Measurement Series “Tritium Analyzing Method” // Science and Technological Agency of Japan. 1997. Vol. 9.
326. Radioecological studies at the Kraton-3 underground nuclear explosion site in 1978–2007: A review / V. Ramzaev, A. Mishine, V. Golikov [et al.] // J. Environ. Radioact. 2009. No. 100. P. 1092–1099.
327. Radiostrontium hot spot in the Russian Arctic: ground surface contamination by ⁹⁰Sr at the “Kraton-3” underground nuclear explosion site / V. Ramzaev, A. Mishine, L. Basalaeva, J. Brown // J. Environ. Radioact. 2007. No. 95. P. 107–125.
328. Radiotoxicity of tritium in mammals / G. Silini, P. Metalli and G. Vulpis // Commission of the European Communities Report prepared by Cnen : Euratom Contract No. 059-71-11 PSTI. Luxembourg, 1973. 36 p.

329. Rank, D. A feasibility study on the retrospective evaluation of anomalous local tritium fallout by the analysis of tree rings from selected districts in Austria and Hungary. Report IAEA-R-3452-F. 1987.
330. Report 2002. DOE: the Tritium Systems Test Assembly at the Los Alamos National Laboratory. 2002.
331. Rudran, K. Significance of in Vivo Organic Binding of Tritium Following Intake of Tritiated Water. *Radiation Protection Dosimetry*. 1988. Vol. 25, No. 1. P. 5–13.
332. Sanders, S. M. J. Assessment of tritium in man / S. M. J. Sanders, W. C. Reinig // *Diagnosis and Treatment of Deposited Radionuclides* / ed. H. A. Kornberg, W. D. Norwood. Amsterdam : Excerpta Medica Foundation, 1968. P. 534–542.
333. Schell, W. R. World distribution of environmental tritium / W. R. Schell, G. Gauzay, W. R. Payne // *Phys. Behav. Radioactive Contaminated Atmos.* Vienna, 1974. P. 375.
334. Sharakshane, A. Whole high-quality light environment for humans and plants // *Life Sciences in Space Research*. 2017. Vol. 15. P. 18–22. DOI:10.1016/j.lssr.2017.07.001.
335. Shem, H.-f. Study of ratio of tritium concentration in plants water to tritium concentration in air moisture for chronic atmospheric release of tritium / Hui-fang Shem, Ren-tai Yao // *Energy Procedia*. 2011. No. 5. P. 2421–2425. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.03.416>.
336. Sissing, R. A. P. TFTR tritium program / R. A. P. Sissing, R. L. Rossmassler // *J. Fus. Technol.* 1988. Vol. 14. P. 923–928.
337. Study of soil water movement and recharge rate of rainfall infiltration in aeration zone of loess by measuring natural tritium / Z. G. Zhang, F. Z. Liu, H. P. Zhang, E. K. Liu // *Hydrogeol. Eng. Geol.* 1990. No. 3. P. 5–7.
338. Suess, H. E. Tritium geophysics as an international research project // *Sci.* 1969. No. 163. P. 1405–1410.
339. Thompson, R. G. Photosynthetic assimilation and translocation of ³H- and ¹⁴C-organic compounds after ³HHO and ¹⁴CO₂ were simultaneously offered to a primary leaf of soybean / R. G. Thompson, C. D. Nelson. *Can. J. Bot.* 1971. No. 49. P. 757–766.
340. Tissue free water tritium and organically bound tritium in the rice plant acutely exposed to atmospheric HTO vapor under semi-outdoor conditions / Y. H. Choi, K. M. Lim, W. Y. Lee [et al.] // *J. Environmental Radioactivity*. 2002. No. 58. P. 67–85.
341. Tritium analysis results of urine samples of Wolseong inhabitants living around heavy water reactor // WSNESC Report. 2011.
342. Tritium in a pine forest ecosystem: relation between fresh pine needles organic materials on a forest floor and atmosphere / N. Momoshima, H. Kakiuchi, T. Okai [et al.] // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 2000. Vol. 243, No. 2. P. 479–482.
343. Tritium in plants: a review of current knowledge / C. Boyer, L. Vichot, M. Fromm [et al.] // *Environ. Exp. Bot.*, 2009. Vol. 67, No. 1. P. 34–51. <https://doi.org/10.1016/j.envexbot.2009.06.008>.
344. Tritium in Streams / P. I. Mitchell, L. León Vintró, J. G. Howlett [et al.] // *Well Waters and Atomic Lakes at the Semi-Palatinsk Nuclear Test Site: Present Status and Future Perspectives. Nuclear Risk in Central Asia : Conference proceedings*. 2008. P. 41–60.

345. Tritium transfer between sea and atmosphere in the English Channel (North Cotentin and Bay of Seine) / D. Maro, L. Tenailleau, M. Fontugne [et al.] // Radioprotection. 2005. Vol. 40. P. 589–594.
346. *Trivedi, A.* Dose contribution from metabolized organically bound tritium after acute tritiated water intakes in humans / A. Trivedi, D. Galeriu, R. B. Richardson // Health Phys. 1997. Vol. 73, No. 4. P. 579–586.
347. Twenty years of tritium internal monitoring in Japan Atomic Energy Research Institute / J. Akaishi, H. Fukuda, T. Hattori, S. Suga // Radiation-risk-protection. Koln : IRPA, 1984. P. 784.
348. Urinary excretion of tritium following exposure of man to HTO — a two exponential model / W. S. Snyder, B. R. Fish, S. R. Bernard [et al.] // Physics in Medicine and Biology. 1968. Vol. 13, No. 4. P. 547–559.
349. *Weinberg, A. M.* The future of nuclear energy // Phys. Today. 1981. Vol. 34, No. 3. P. 48–56.
350. *Workman, W. J.* Tritium Concentrations Inside the Homes of Occupationally Exposed Workers / W. J. Workman, A. Trivedi, R. J. Cornett // Health Phys. 1998. No. 75 (1). P. 56–59.
351. WR-1 Reactor Radiological Characterization Summary and Radionuclide Inventory Estimates. CNL (2016a) WLDP-26100-041-000-0001. 2023.
352. *Yoon, S.* Tritium analysis of urine samples from the general Korean public / S. Yoon, W.H. Ha, S.S. Lee // Appl. Radiat. Isot. 2013. No. 81. P. 276–278.



Бондарева Лидия Георгиевна, кандидат химических наук, доцент, профессор РАЕН. Автор более 150 научных работ и учебника для высшей школы, включая 10 монографий, а также отдельные главы в коллективных монографиях. Автор 10 авторских свидетельств на рациональные предложения и патенты, в том числе промышленные образцы. Ведущий научный сотрудник и заместитель начальника испытательного центра ФБУН «Федеральный научный центр гигиены имени Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора (Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека). Заслуженный работник образования и науки. Кавалер ордена «За заслуги».

E-mail: lydiabondareva@gmail.com



Чеботина Маргарита Яковлевна, доктор технических наук, профессор, автор 260 научных работ, из них 9 монографий. Ведущий научный сотрудник Института экологии растений и животных УрО РАН, г. Екатеринбург.

E-mail: Cebotina@ipae.uran.ru



Артамонова Светлана Юрьевна, доктор геолого-минералогических наук, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, автор и соавтор более 99 научных трудов, включая 3 монографии и 2 патента. В 2011 г. награждена Почётной грамотой Государственного собрания (Ил Тумэн) Республики Саха (Якутия) за значительный вклад в развитие научных исследований в области обеспечения радиационной безопасности Республики Саха (Якутия).

E-mail: artam@igm.nsc.ru



Тананаев Иван Гундарович, член-корреспондент РАН, доктор химических наук, профессор, заместитель генерального директора по научной работе Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», директор Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья имени И.В. Тананаева КНЦ РАН, член Высшей аттестационной комиссии при Минобрнауки России, советник генерального директора ФГУП «ПО «Маяк». Автор более 900 научных трудов.

E-mail: i.tananaev@ksc.ru



ISBN 978-5-91137-499-0



9 785911 374990