М. Я. Чеботина

МОНИТОРИНГ ТРИТИЯ
В ВОДНЫХ СРЕДАХ УРАЛЬСКОГО РЕГИОНА

Российская академия наук
Уральское отделение
Институт экологии растений и животных

М. Я. Чеботина

МОНИТОРИНГ ТРИТИЯ В ВОДНЫХ СРЕДАХ УРАЛЬСКОГО РЕГИОНА

Монография

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2022

УДК 502.51:504.5
ББК 26.22
Ч 34

Ответственный редактор:
Е. В. Поляков, доктор химических наук

Чеботина, М. Я.
Ч 34 Мониторинг трития в водных средах Уральского региона : монография / отв. ред. Е. В. Поляков. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2022. – 120 с. : ил. – Библиогр. : с. 110–119. – 310 экз. – ISBN 978-5-7996-3519-0. – Текст : непосредственный.

ISBN 978-5-7996-3519-0

В монографии обобщены результаты многолетних исследований загрязнения тритием природных водных сред на территории Уральского региона. В фокусе внимания зоны воздействия крупных энергетических объектов − Производственное объединение «Маяк» и Белоярская АЭС им. Курчатова. Приводятся данные о надфоновом загрязнении тритием природных объектов и сред, испытывающих воздействие атомных предприятий по сравнению с контрольными территориями. Рассматривается загрязнение водоемов, рек, болот, дождевых осадков, снежных выпадений, источников питьевого водоснабжения, мочи людей.

Для специалистов-радиоэкологов и гигиенистов, преподавателей и студентов экологических специальностей, широкого круга читателей, интересующихся экологическими проблемами Уральского региона.

УДК 502.51:504.5
ББК 26.22

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.

ISBN 978-5-7996-3519-0
© Чеботина М. Я., 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ 12

Глава 1. ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ «МАЯК» 17
§ 1. Характеристика района исследований 17
§ 2. Водоемы производственного назначения 20
§ 3. Водоемы комплексного назначения 25
§ 4. Дождевые осадки на промышленной территории 29
§ 5. Снежный покров 32
§ 6. Источники питьевого водоснабжения 37
§ 7. Водная экосистема р. Теча 41
§ 8. Водная экосистема р. Мишеляк 47
§ 9. Организм человека 49
§ 10. Район г. Озерска 51

Глава 2. БЕЛОЯРСКАЯ АЭС им. КУРЧАТОВА 61
§ 1. Характеристика района исследований 61
§ 2. Белоярское водохранилище 62
§ 3. Ольховская болотно-речная экосистема 71
§ 4. Водная система р. Пышмы 76
§ 5. Воздушная среда 84
§ 6. Дождевые и снеговые осадки 86
§ 7. Источники питьевого водоснабжения 92
§ 8. Моча людей 101

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 103

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ 110

ВВЕДЕНИЕ

Тритий (^3H или T) – радиоактивный изотоп водорода с массовым числом 3 – был открыт Э. Резерфордом, М. Олифантом и П. Хартеком в 1934 г. Это чистый β-излучатель с периодом полураспада 12,4 года. Максимальная энергия β-частиц составляет 18,6 кэВ, а максимальный пробег в ткани – 6,5 мкм. Тритий образуется в верхних слоях атмосферы в результате взаимодействия космического излучения с ядрами атомов азота, кислорода, аргона и др., а также в литосфере и гидросфере при взаимодействии нейтронов с литием земной коры [Виноградов, Девирц, Добкина; Shell, Gauzay, Payne]. Образовавшийся в атмосфере тритий в результате процессов окисления или обмена с водородом переходит в молекулы воды (HTO) и поступает в тропосферу, а затем в гидросферу. Поскольку водород – один из главных и широко распространенных элементов в биосфере, его изотоп тритий, входящий в состав воды, является идеальной меткой при исследовании переноса влагосодержащих воздушных масс в тропосфере и стратосфере и круговороте воды в природе.

Человек, состоящий почти на 70 % из воды, всегда содержит в себе тритий. Радиационное воздействие радионуклида на организм происходит при употреблении продуктов питания, содержащих тритий, а также при дыхании и через кожный покров. При этом весь организм подвергается воздействию β-излучения трития, в связи с чем его можно отнести к числу важнейших дозообразующих радионуклидов. Уникальность его действия на организм состоит в том, что тритий входит в состав многих биологически значимых органических соединений, в том числе в структуру ДНК, и может вызывать радиационно-индуцированные генетические повреждения [Журавлев; Демин, Телушкина; Генетические структуры; Pinson, Langham; Moghissi, Brethauer, Patzer; Summary update; Effect of micronizing…; Quanti fying…; Fairlie].

В настоящее время в окружающей среде присутствует тритий как естественного, так и искусственного происхождения. До нача-

ла проведения испытаний ядерного оружия концентрация природного трития в пресной воде не превышала 1 Бк/л [Давыдочкина]. Эту величину условно можно принять за уровень естественного (природного) фона. По оценкам разных авторов, общее содержание естественного трития на планете во всех средах в это время составляло примерно 1,8 кг (640–2500 РБк, или 17–80 МКи) [Моисеев, Иванов; Ларин, 2002; Тритиевые исследования…; Kaufman, Libby; Teegarden; Piel; Kolb; NCRP]. В докладе Научного комитета ООН по действию атомной радиации за 1977 г. общее количество естественного трития принимается равным ~ $1{,}3 \cdot 10^{18}$ Бк [Источники…]. Основное количество природного трития находится в воде морей и океанов.

С началом испытаний ядерного оружия естественное распределение трития на Земле было нарушено. Поступление радионуклида от взрывов атомных бомб (бомбовый тритий) началось в 1945 г. С 1945 по 1998 г. в мире произведено более 2 000 испытаний ядерного оружия, которые проводились почти на всех континентах более чем в 20 местах земного шара (в Неваде – 935, Нью-Мексико – 3, Миссисипи – 2, Колорадо – 2, на Аляске – 3, в России – 241, Казахстане – 496, на Украине – 2, в Узбекистане – 2, Туркменистане – 1, Китае – 45, Алжире – 17, Австралии – 12, Индии – 6, на островах Рождества – 30, на атоллах Муруроа – 175, Эниветок – 43, Бикини – 23, Джонстон – 12, Фангатофа – 12, Молдлен – 3, в Тихом океане – 4, в Южной Атлантике – 3) [Довгуша, Тихонов].

В процессе проведения испытаний содержание радионуклида на планете непрерывно росло. Это обстоятельство побудило Международное агентство по атомной энергии и Всемирную метеорологическую организацию начать систематические исследования уровней концентраций трития в осадках по всему земному шару с целью сбора данных о динамике содержания трития на уровне земли, анализа путей его миграции и определения его точных запасов в отдельных местах и в разные периоды времени. Для этой цели было создано 102 станции наблюдений на суше и в океане (на островных станциях и на кораблях) в обоих полушариях Земли. Полученные за период 1961–1965 гг. данные выявили общую тенденцию к росту концентраций трития в осадках и общего количества радионуклида на планете [Тетчер, Пейн, Камерон]. Если к лету 1961 г. количество накопленного на земном шаре трития оценивалось в 40 кг, то в результате испытаний 1961 г. оно увеличилось до 68 кг, от испытаний 1962 г. – до 100 кг, а к лету 1962 г.

запасы трития достигли 200 кг. В период испытаний к 1970 г. в атмосферу Земли было введено 100 ЭБк (2740 МКи) трития в Северном полушарии и 30 ЭБк (820 МКи) – в Южном, что значительно больше естественного содержания этого радионуклида. Установлено, что период пребывания трития в стратосфере Северного полушария составляет ~ 1 год, а время его полуобмена между Северным и Южным полушарием – 5 лет [Алексахин]. В результате исследований выявлены некоторые общие закономерности распределения трития в осадках Северного и Южного полушарий. В частности, в осадках Северного полушария в период массовых испытаний и в первые годы после их запрещения концентрации трития были намного выше, чем в осадках Южного полушария. Например, в 1958–1960 гг. осадки континентальных участков Северного полушария имели среднее значение содержания радионуклида около 120 Бк/л, а в 1963 г. – около 600 Бк/л. Осадки в Южном полушарии в 1963 г. характеризовались средним значением порядка 2 Бк/л. Такие различия связаны с тем, что практически все термоядерные испытания проводились в Северном полушарии, а связь атмосферы двух полушарий затруднена. Кроме того, большую часть поверхности Южного полушария составляет океан, который интенсивно вымывает тритий из атмосферы за счет молекулярного обмена атмосферной влаги с водной поверхностью. Обнаружен эффект возрастания концентрации трития в осадках с увеличением высоты местности. Эффект четко проявляется в Северном полушарии. В Южном полушарии, ввиду отсутствия поступления систематических данных со станций наблюдения, с одной стороны, и преобладанием океана над сушей – с другой, выявление высотного эффекта оказалось затруднительным. Выявлен широтный эффект в концентрациях трития в осадках: для средних широт ясно прослеживается увеличение концентраций радионуклида в северном направлении. Отмечены сезонные вариации в выпадениях трития с атмосферными осадками. Как правило, максимум выпадений приходится на весенне-летний период, что объясняется более активной связью стратосферы и атмосферы в это время года. Установлена связь в атмосферных выпадениях между содержанием трития, с одной стороны, и ^{90}Sr и ^{137}Cs – с другой. Как правило, пики выпадений трития следуют за пиками выпадений ^{90}Sr и ^{137}Cs с отставанием на 1–2 месяца. Отношение концентраций трития и ^{90}Sr в осадках изменяется с годами. Непосредственно после серии испытаний ядерного оружия доля ^{90}Sr бывает

относительно выше. Указанное отношение отражает изменение долей тропосферных и стратосферных выпадений непосредственно после серии испытаний и в более отдаленные периоды времени. Установлено, что средняя величина отношения НТО/^{90}Sr в пяти пунктах наблюдений Южного полушария равна 60 при незначительных индивидуальных отклонениях от этой цифры. Указанная информация дает возможность рассчитывать концентрации НТО в выпадениях для тех пунктов южного полушария, где измерения трития в выпадениях не проводились, измерялись только концентрации ^{90}Sr [Тетчер, Пейн, Камерон; Тритий в атмосферных осадках…; Miyake, Saruhashi, Brown].

После прекращения массовых испытаний ядерного оружия наметилась общая тенденция к снижению содержания трития в атмосферных выпадениях. Например, для европейской части нашей страны в 1961–1963 гг. концентрация радионуклида в осадках в среднем составляла 45–60 Бк/л, а к 1973–1975 гг. среднегодовое значение снизилось до 12–18 Бк/л [Виноградов, Девирц, Добкина; Тритий в атмосферных осадках…]. К 1969 г. разница концентраций трития в обоих полушариях почти сгладилась. Можно считать, что за 6–8 лет после прекращения испытаний произошло полное смешение влаги в стратосфере Северного и Южного полушарий [Environmental…, 1969–1973].

Содержание трития в поверхностных водах рек и Мирового океана имеет ту же тенденцию, что и в осадках. С началом периода массовых испытаний происходило постоянное повышение его содержания в воде. Максимальный уровень для рек умеренных широт северного полушария (около 200 Бк/л) отмечен в 1964 г. После прекращения массовых испытаний содержание радионуклида в воде стало снижаться. В водах рек Западной и Юго-Западной части бывшего СССР оно составляло 10 Бк/л, Севера Европейской части страны – 15 Бк/л, Сибири и Средней Азии – 28 Бк/л [Тритий в реках умеренных широт…]. Тенденция снижения концентраций трития после прекращения испытаний хорошо прослеживалась на примере р. Москвы (в 1960, 1967, 1968 гг. она составляла соответственно 43 ± 1, 13 ± 1 и 8 ± 1 Бк/л) [Виноградов, Девирц, Добкина]).

Основные закономерности распределения трития в водах земного шара сводятся к следующему. Как и в атмосферных осадках, концентрация трития в реках и озерах (при прочих равных условиях) возрастает при движении в глубь континентов. Уровни содержания радионуклида в водах открытого океана существенно

ниже, чем в водах замкнутых морей, озер и рек континентов. Последнее связано с интенсивным перемешиванием атмосферных выпадений в толще воды океана. В глубоководных водоемах наиболее высокая концентрация трития обнаружена в поверхностных слоях воды, тесно связанных с атмосферными выпадениями [Тритий в атмосферных осадках…].

После стабилизации выпадений в результате прекращения испытаний ядерного оружия концентрация радионуклида в воде установилась на более высоком уровне, чем до испытаний, очевидно, за счет вклада наработанного в период испытаний радионуклида. При этом часть трития вошла в тела живых организмов планеты, поглотилась почвами и донными отложениями и освобождается из них в водную среду с замедленной скоростью [Тетчер, Пейн, Камерон; Природные изотопы…; Стыро, Коротков].

По данным ряда работ, установившийся после прекращения массовых ядерных испытаний уровень концентраций трития в водных средах для разных регионов нашей страны варьирует в пределах 4–7 Бк/л при среднем значении ~ 5 Бк/л. [Радиоактивное загрязнение…; Изучение содержания трития…; Гудков; Иваницкая, Малофеева; Чеботина, Николин, 2005а]. Эту величину, обусловленную вкладом трития естественного происхождения и прежними термоядерными испытаниями, условно будем называть уровнем техногенного фона по данному радионуклиду.

В настоящее время основным источником техногенного трития является атомная промышленность (АЭС, исследовательские реакторы, заводы по регенерации ядерного топлива и пр.). По данным Международного агентства по атомной энергии, на 21 марта 2014 г. в мире функционировало 435 энергоблоков АЭС с мощностью 372 ГВт, на стадии строительства находилось 72 реактора в 15 странах мира с мощностью 68 ГВт. Наибольшее количество работающих энергоблоков размещено в США (104), Франции (58), Японии (48), Российской Федерации (33), Республике Корея (23), Индии (21), Китае (21), Тайване (19), Канаде (19), Великобритании (16), Украине (15), Швеции (10) [Список АЭС мира]. По данным некоторых работ, сбросы трития с жидкими отходами при работе реакторов разного типа составляют 5–130 ТБк/год [Pilmer, Denovan; Garbinsky, Pseniska]. Заводы по переработке ядерного горючего выбрасывают в окружающую среду в год около 600 ТБк трития в виде газообразных и около 15 ПБк – в виде жидких отходов.

В районах расположения крупных ядерно-энергетических объектов наблюдается локальное повышение содержания трития в объектах природной среды (воде, воздухе, дождевых и снеговых осадках). Об этом свидетельствуют многочисленные литературные данные, полученные за рубежом и в нашей стране [Беловодский, Гаевой, Гришмановский; Григорьева, Томилин; Старков, Моисеева; Экологические проблемы…; Природно-техношенные гидрохимические аномалии…; Субботин; Elwood; Twenty years of tritium…].

Относительно радиационной опасности трития в районах расположения предприятий ЯТЦ существуют разные точки зрения. По мнению Ю. А. Егорова, представителя ФГУП «Концерн “Росэнергоатом”», поступающий в окружающую среду с жидкими сбросами АЭС тритий радиационной опасности не представляет, поэтому в организации постоянного контроля сбросов и выбросов трития нет необходимости [Егоров, 1996; Егоров, 2002]. Автор объясняет такой подход незначительной дозовой нагрузкой от трития, получаемой людьми в процессе водопользования водоемом-охладителем и прилежащей территорией (питья воды, приготовления пищи, водопоя скота, потребления рыбы, мяса и молока животных, купания в водоеме и пр.). Очевидно, такая точка зрения объясняется, с одной стороны, сравнительно высоким допустимым уровнем концентрации трития в питьевой воде, принятой в нашей стране, а с другой – отсутствием данных научных исследований о воздействии малых количеств трития на организм человека.

По мнению других авторов, наличие тритиевого загрязнения вокруг АЭС скоро станет главной головной болью [Довгуша, Тихонов]. Последнее можно объяснить комплексом причин, среди которых следующие: 1) тритий относится к числу наиболее широко распространенных в природе радионуклидов, он встречается практически во всех природных водных средах и живых организмах; 2) его концентрация в воде на несколько порядков величин выше по сравнению с другими радионуклидами; 3) тритий весьма подвижен в природной среде и перемещается на большие расстояния; 4) в настоящее время отсутствуют эффективные меры улавливания трития; 5) при попадании в организм весь организм подвергается воздействию β-излучения трития, в связи с чем тритий можно отнести к числу важнейших дозообразующих радионуклидов; 6) загрязнение тритием грунтовых вод имеет место даже при нормальной эксплуатации большинства АЭС; 7) очистка природных сред, загрязненных радионуклидом, практически не представляется возможной.

Согласно проведенным исследованиям, в результате возможного локального повышения концентраций трития в среде в районах расположения ядерно-энергетических комплексов неизбежно воздействие радионуклида на животных и человека. Внешнее облучение тритием не представляет существенной опасности, поскольку слой кожи защищает его от проникновения β-частиц внутрь организма. Наибольшую опасность радионуклид представляет как источник внутреннего облучения при поступлении в организм. Тритий отличается от других радионуклидов малым пробегом β-частиц, который значительно меньше размеров клетки (средняя длина пробега β-частиц трития в мягкой ткани от 0,5 до 2 мкм; для сравнения: ^{42}K – 19000 мкм, а ^{32}P – 8000 мкм). В связи с этим тритий создает высокую плотность ионизации. При поражении им преимущественно облучаются те структуры клеток и тканей, которые содержат изотоп или находятся в близком соседстве с атомами трития. Токсический эффект этого радионуклида усугубляется тем, что его атомы при распаде превращаются в атомы инертного элемента гелия – ^{3}He, который выпадает из соответствующей водородной связи и разрушает ее. Этот эффект особенно заметен для тех видов живых организмов, продолжительность жизни которых соизмерима с периодом полураспада трития, в частности для человека.

На различных видах животных показано, что при введении трития в организм в виде НТО 98–99 % радионуклида поступает в водную фазу и лишь 1–2 % – в тканевые структуры. В ткани радионуклид распределяется таким образом, что в расчете на грамм сырого вещества больше всего его находится в печени, затем мышцах, коже и меньше всего в костях [Окись трития; Богданов; Эванс]. Через некоторое время после однократного введения происходит перераспределение тритиевой воды в организме. Если в первые дни после введения почти весь тритий находится в водной фазе, то спустя месяц после инъекции основная его часть входит в органические структуры ткани и надолго задерживаются в них, облучая радиочувствительные части клеток [Журавлев; Bogen, Welford; Strack, Bonotto, Kirchmann; Tazima].

При включении трития (НТО) в органическое вещество живых организмов и грунтов в ряде работ отмечена его дискриминация по отношению к протию [Штуккенберг; Jones; Elwood; Farlane, Beckert, Brown; Adams, Peterle, White; Bleylock, Frank]. Наблюдаемый изотопный эффект обусловлен большими разницами в массах указанных изотопов водорода, что приводит к заметным различиям

в физических и химических свойствах их соединений [Дерпгольц; Jones]. В частности, известно, что константы скоростей реакций различаются для аналогичных соединений, меченых и не меченых тритием [Weston]. Наряду с изложенными выше фактами о дискриминации трития относительно протия при включении его в органическое вещество объектов природной среды имеются сведения о большем включении в органическое вещество трития относительно протия [Cohen, Kneip; Annales de l'Association…; Adams, Peterle, White]. С нашей точки зрения, случаи повышенного накопления трития относительно протия можно объяснить рядом причин: временем экспозиции объекта в тритиевой воде, флуктуациями концентраций трития в воде, особенно в районах поступления радионуклида от предприятий ЯТЦ, химической формой соединений трития, сезонными вариациями, источниками поступления трития в биоту (вода, осадки, пища), методическими особенностями эксперимента и другими причинами.

Допустимая концентрация трития в питьевой воде в официальном нормировании нашей страны в разное время варьировала в несколько раз. В настоящее время используется допустимая концентрация 7600 Бк/л [Кочетков, Монастырская, Кабанов]. Указанный норматив значительно снижен по сравнению с аналогичными показателями более ранних лет [Радиационная обстановка…, 2004]. Нормативы допустимых концентраций в Европейских странах, США, Канаде и других в целом заметно ниже, чем в нашей стране [Moghissi, Cothern; Canadian…; Reference…; Hanf, Kelly; Drinking Water…; A Data Base…]. Очевидно, это связано с тем, что научное сообщество этих стран осознает радиационную значимость трития и ставит его в один ряд с таким опасным радионуклидом, как плутоний.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Работу проводили в Уральском регионе, в зоне воздействия двух крупных атомных предприятий – Производственного объединения «Маяк» (ПО «Маяк») и Белоярской атомной электростанции им. И. В. Курчатова (БАЭС). Объектами исследований служили различные водные среды (вода водоемов, рек, родников, скважин, колодцев, снеговые и дождевые осадки, моча людей) в зоне воздействия предприятий и в контрольных регионах.

Воду для определения содержания трития в природных источниках отбирали по 0,5–1 л в двух-трех повторностях. Пробы снега брали в конце периода снеготаяния (марте) на всю глубину снежного покрова с площади 15х15 см. Сбор дождевых и снеговых выпадений производили с апреля по октябрь с помощью специально оборудованных стеклянных емкостей, установленных на высоте 1 м от поверхности почвы. Для анализа отбирали среднюю пробу в количестве 0,5 л. Все пробы, в том числе из растаявшего снега, фильтровали через бумажный фильтр, дистиллировали и хранили в холодильнике в плотно закрытых сосудах.

Для количественного определения трития в пробах природной воды проводили предварительное обогащение методом одноступенчатого электролиза с одним или двумя доливами [Чиркова]. 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 производили с помощью специально сконструированной электролитической установки, представляющей собой плексигласовую ванну, которая наполняется дистиллированной водой (рис. 1). На верхней панели крепятся два ряда электролизеров. 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 ºС.

Электролизеры представляют собой стеклянные трубки, изготовленные из термо- и химически стойкого стекла. В электролизеры вставляются электроды, представляющие собой пять параллельных пластин, изготовленных из мягких сортов стали, между которыми 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) за пределы помещения.

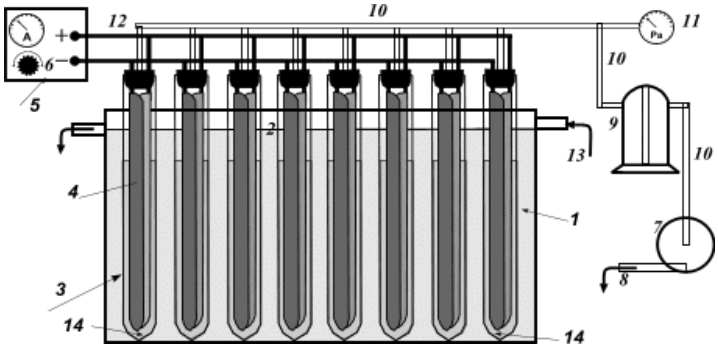

Рис. 1. Общий вид установки для электролитического обогащения водных проб тритием: 1 – плексигласовая ванна; 2 – змеевик (холодильник); 3 – электролизеры; 4 – электроды; 5 – блок питания; 6 – регулятор тока; 7 – вытяжной компрессор; 8 – вывод; 9 – конденсор; 10 – газовыводящие трубки; 11 – манометр;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

В электролизеры заливается по 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. Длительность одного электролиза – от 8 до 12 суток.

По окончании процесса электролиза замеряется объем воды после обогащения, затем ее помещают в колбы из термостойкого стекла и добавляют в каждую по 9 г нитрата свинца для нейтрализации электролита. Это необходимо для того, чтобы извлечь водород из гидроксида калия во избежание изотопных эффектов. Воду отгоняют путем дистилляции до сухого состояния осадка.

В процессе приготовления проб в специальные флаконы из бескалиевого стекла наливали по 11 мл сцинтилляционной жидкости (ЖС-8) и добавляли по 1 мл очищенной путем дистилляции пробы. Тщательно закрытые пузырьки помещали в гнезда счетчика на сутки для стабилизации. Определение концентрации трития в пробах с содержанием радионуклида > 100 Бк/л проводили без обогащения.

При определении концентрации трития в пробе выполняли следующие процедуры:

1. Измерение фона счетной установкой «Дельта-300» ($N_ф$ имп./мин).

2. Определение эффективности счета (E) для каждой партии проб, используемой в электролизе. Эффективность счета представляет собой отношение показателя счета стандарта с известным содержанием трития (расп./мин/мл) к показателю счета счетной установки (имп./мин/мл).

3. Определение начальной ($'N_0$) и конечной ($'N_к$) удельной активности контрольной пробы с известным содержанием трития за вычетом фона.

4. Определение коэффициента обогащения (R) как отношения конечной и начальной удельной активности контрольной пробы ($R = 'N_к / 'N_0$).

5. Определение коэффициента сокращения объема (К) как отношение объема контрольной пробы до электролиза к объему этой пробы после электролиза.

6. Определение коэффициента разделения (β), который указывает на степень потерь трития при электролитическом обогащении: $\beta = \frac{1}{1-\lg R/\lg E}$.

7. Измерение удельной активности исследуемой пробы ($N_{пробы}$) после электролиза за вычетом фона ($N_ф$).

8. Определение коэффициента сокращения объема воды данной пробы (′К) как отношение начального объема пробы (V_0) к конечному ее объему после электролиза ($V_к$).

9. Учет потери трития при откачке газов из электролизеров (к): $к = ′К^{1-1/\beta}$.

10. Вычисление абсолютной радиоактивности анализируемой пробы после электролиза $C_к$: $C_к = (N_{пробы} - N_ф) \cdot 1000 \cdot 37 / v \cdot E \cdot 2{,}22 \cdot 10^3$, где v – объем пробы при просчете в счетчике (1 мл); 1000 – коэффициент для пересчета объема пробы на 1 литр; E – эффективность счета; $2{,}22 \cdot 10^3$ и 37 – табличные значения коэффициентов пересчета результата от расп./мин к беккерелям.

Ошибка бэта-счета на счетной установке не превышает 5 %, чувствительность метода составляет 3 Бк/л.

Для оценки надежности метода неоднократно производили сверку методов, применяемых в Институте экологии растений и животных УрО РАН и других научных организациях. Результаты определения свидетельствуют о достаточно хорошей сходимости методов.

При исследовании загрязнения тритием донных отложений Ольховского болота, расположенного в зоне воздействия Белоярской АЭС, образцы грунта отбирали торфобуром до глубины 120–160 см по 50–100 г на повторность, помещали в банки с крышками и хранили в морозильной камере холодильника. В процессе анализа свободную воду извлекали из оттаявшего грунта путем фильтрования через бумажный фильтр, а затем из него выделяли капиллярную, адсорбированную и кристаллизационную формы влаги указанным выше способом.

При анализе проб мочи ее подвергали трехкратной дистилляции. Все пробы с концентрацией трития больше 100 Бк/л анализировали без обогащения, остальные пробы (меньше 100 Бк/л) обогащали с использованием одноступенчатого электролиза.

Просчет проб воды на содержание трития осуществляли на американской установке «Дельта-300». Определение концентрации трития проводили относительным методом, путем сравнения со стандартным раствором. Для этого в процесс электролиза включали контрольный электролизер с известным содержанием трития в воде. Такой раствор предварительно готовили на основе стандартного раствора, полученного от фирмы «Изотоп».

Статистическая обработка результатов заключалась в определении среднеарифметического значения и среднеквадратических ошибок среднего арифметического [Стрелков]. Результаты в случае необходимости обрабатывали с помощью *t*-критерия [Бейли; Плохинский] и компьютерной программы Statistika.

Для интерпретации полученных данных по выявлению вклада локальных источников в загрязнение тритием природной среды исследуемой территории был уточнен показатель уровня техногенного фона для Уральского региона. Для этой цели были обследованы различные водные источники на севере Свердловской области, где отсутствуют предприятия ядерно-топливного цикла. В качестве объектов исследования служили реки Лобва, Йов, Серебрянка, водоем в Краснотурьинске, дождевая и колодезная вода в г. Кыт-

лым, снеговая вода с Косьвинского плеча [Чеботина, Николин, 2005]. Концентрация трития в указанных водных источниках оказалась близкой к 5 Бк/л и была принята нами в качестве реперной величины техногенного фона по тритию для Уральского региона.

Глава 1

ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ «МАЯК»

§ 1. Характеристика района исследований

Производственное объединение «Маяк» расположено на восточном склоне Уральских гор в Челябинской области и относится к территории Озерского городского округа. Создание производства было определено постановлением СНК СССР № 3007–892 от 1 декабря 1945 г. и направлено на создание новой отрасли промышленности, предназначенной для получения оружейного плутония и переработки делящихся материалов с целью создания паритета в области производства ядерного оружия. Строительство предприятия началось в 1946 г. Промышленная площадка будущего предприятия размещалась за каскадом Каслинско-Кыштымских озер на восточном берегу оз Кызылташ, в районе истока р. Теча. Пуск первого прямоточного уранграфитового ядерного реактора состоялся в июле 1947 г. В декабре 1948 г. введен в эксплуатацию радиохимический завод по выделению оружейного плутония. В 1962 г. введен в эксплуатацию завод по производству радиоактивных материалов, в 1977 г. – комплекс РТ-1 по регенерации облученного ядерного топлива. В 1991 г. запущен цех остекловывания жидких высокоактивных отходов. По состоянию на 2011 г., производственное объединение « Маяк» включало в себя семь основных заводов и 16 вспомогательных подразделений с числом работающих более 12 000 человек. Предприятие занимает площадь 256 км^2 и включает реакторное, радиохимическое, химико-металлургическое, радиоизотопное и приборостроительное производства и ряд структурных подразделения (управление, центральная заводская лаборатория и пр.).

В начальный период работы предприятия информация о воздействии радиоактивных веществ на объекты окружающей среды была весьма ограничена. Поэтому при проектировании атомных объектов во многих странах мира 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 р. 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 населенных пунктов получили значительное радиационное воздействие [Мокров, 2002а; Мокров, 2002б). Всего в гидрографическую сеть реки поступило ~ $8{,}8 \cdot 10^{16}$ Бк (2,78 МКи) радионуклидов [Садовников, Глаголенко, Дрожко].

После периода интенсивных сбросов в р. Теча с 1949 по 1956 г. с целью снижения поступления радионуклидов в открытую гидрографическую сеть была проведена реконструкция русла реки и создание на ней серии водоемов-хранилищ (В-3, В-4, В-10, В-11), отделенных плотинами. В обход каскада водохранилищ были сооружены левобережный обводной канал (ЛБК), сбрасывающий «чистую» воду из оз. Иртяш, и правобережный обводной канал (ПБК), принимающий стоки р. Мишеляк. Оба канала заканчиваются ниже плотины водоема В-11 и впадают в р. Теча ниже каскада водохранилищ (рис. 2).

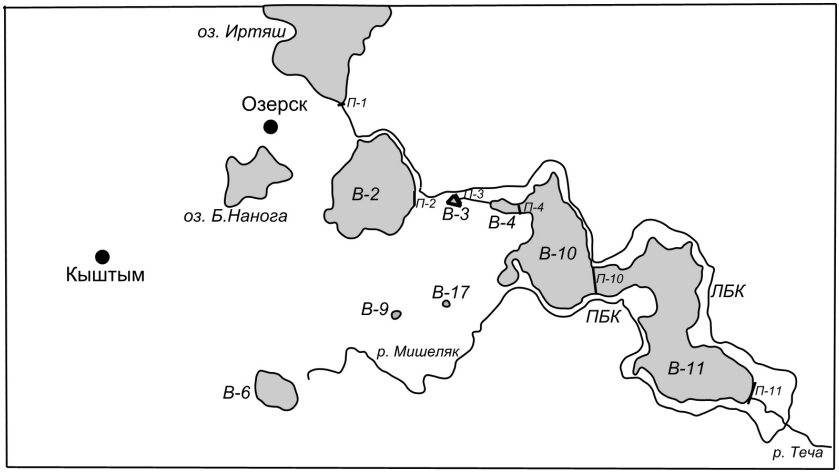

Рис. 2. Карта-схема расположения производственных водоемов в зоне воздействия ПО «Маяк» [Садовников, Глаголенко, Дрожко].

К числу наиболее «грязных» водоемов, эксплуатировавшихся производственным водоемом «Маяк», относятся оз. Кызылташ (В-2), Карачай (В-9) и Старое Болото (В-17). Первый из них с 1948 г. по настоящее время используется в качестве водоема – охладителя ядерных реакторов и для сброса слаборадиоактивных, химических и хозбытовых веществ. На начальном этапе эксплуатации озеро было проточным; с северо-запада в него впадала р. 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 водоем 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 ~4030 ТБк. В середине 50-х гг. водоем подвергался сильному тепловому воздействию. В начале сбросного канала температура воды достигала 90 °С. После прохождения через сбросной канал длиной ~2,5 км она охлаждалась до 50–70 °С. В зимний период значительная часть водоема не замерзала. Такой тепловой режим приводил к испарению воды с поверхности озера. После 1990 г. с выводом из эксплуатации нескольких промышленных реакторов поступление избыточного тепла в водоем сократилось [Смагин, 2007; Смагин, 2013].

Озеро Карачай (В-9) с октября 1951 г. использовалось для удаления радиоактивных отходов. За время эксплуатации в озере скопилось около 120 млн кюри (4 ЭБк) радиоактивных материалов (в основном ^{137}Cs и ^{90}Sr). 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, загрязненная в результате этого территория получила название Карачаевского следа. Начиная с 1967 г. ПО «Маяк» проводились работы по засыпке мелководий, поднятии берега по периметру водоема, рекультивации территории вокруг водоема. К ноябрю 2015 г. водоем был полностью закрыт скальным грунтом и бетонными блоками. К настоящему времени водное зеркало оз. Карачай практически отсутствует, однако на глубине сохраняется линза загрязненных вод, которая движется в направлении рек Мишеляк и Теча.

Водоем Старое Болото (В-17) представляет собой искусственный водоем, расположенный в естественной впадине рельефа. Начало

сбросов радиоактивных отходов в Старое Болото относится к 1949 г. В 1952 и 1954 гг. были построены дамбы, исключающие попадание воды из водоема в открытую гидрографическую сеть. Максимум хранящейся в водоеме активности приходилось на конец 1957 г., когда в процессе ликвидации последствий аварии этого года на ПО «Маяк» в водоем сбрасывались высокоактивные продукты из емкостей-хранилищ, что существенно повлияло на радионуклидный состав экосистемы водоема. В настоящее время в водоеме депонировано более 1 млн Ки (37 ПБк) среднеактивных отходов, при этом суммарная активность β-излучателей определяется $^{90}Sr+^{90}Y$ и ^{137}Cs. 99 % активности всех радионуклидов, за исключением трития, депонировано в грунте [Закономерности пространственного распределения…].

С 1951 г. по мере накопления научных знаний о поведении радионуклидов в природной среде и о воздействии их на организм человека на ПО «Маяк» стали проводиться мероприятия, направленные на снижение радиационной опасности территории: прекращен прямой сброс жидких радиоактивных отходов в р. Теча, часть поймы реки изъята из хозяйственного пользования, засыпано озеро Карачай, жидкие радиоактивные отходы переводятся в твердые формы. С 2008 г. принята к реализиции Федеральная целевая программа «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности». С 2014 г. введен 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.

§ 2. Водоемы производственного назначения

При постоянном сбросе повышенных концентраций трития в открытые водоемы 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 водоемов ПО «Маяк», которая включает в себя водные объекты в долине старого русла р. Течи (В-2, В-3, В-4, В-10, В-11) и водоемы, расположенные южнее Теченского каскада (Татыш, Ка-

рачай и Старое болото) (рис. 2). Указанные водные объекты располагаются на территории санитарно-защитной зоны предприятия.

Исследование содержания трития в водоемах Теченского каскада проводили в период 2007–2009 гг. [Чеботина, Николин, Мурашова, 2010]. Пробы воды из исследуемых водоемов 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. 3 показана динамика концентраций трития в исследуемых водоемах в течение трехлетнего периода наблюдений. В указанный период содержание радионуклида в каждом водоеме варьировало в среднем в 2–3 раза. В водоеме В-2 показатели

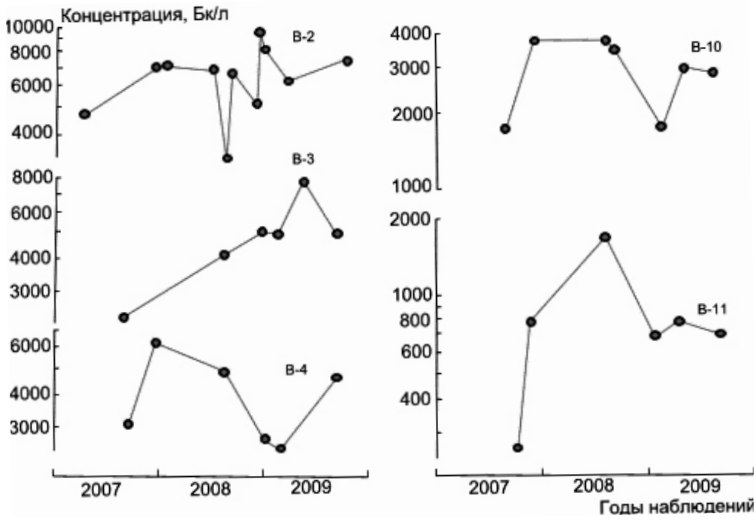

Рис. 3. Динамика концентраций трития в производственных водоемах ПО «Маяк»

концентраций изменялись от 3 200 до 10 000 Бк/л, В-3 – от 2 400 до 8 100 Бк/л, В-4 – от 2 400 до 6 300 Бк/л, В-10 – от 1 900 до 3 800 Бк/л, В-11 – от 700 до 1 800 Бк/л. Средние значения содержания трития в указанных водохранилищах в этот период составляли: В-2–6 730 ± 830 Бк/л; В-3–4 970 ± 1 000 Бк/л; В-4–4 000 ± 690 Бк/л; В-10–2 910 ± 300 Бк/л; В-11–850 ± 270 Бк/л. В воде р. Теча после

впадения в нее ЛБК и ПБК содержание трития в момент исследования составило в среднем 163 ± 41 Бк/л.

Результаты исследования показали, что средняя концентрация радионуклида снижалась в направлении от водоема В-2 к водоему В-11, это снижение составило в среднем восемь раз. На рис. 4 представлены усредненные за наблюдаемый период концентрации радионуклида в воде указанных водоемов в зависимости от расстояния места отбора проб до истока р. Теча (истоком реки считали место ее вытекания из оз. Иртяш). Наличие экспоненциальной зависимости между исследуемыми параметрами, полученное для трехлетнего периода наблюдений, свидетельствует о том, что все водоемы, расположенные в русле реки Течи, в том числе и водоем 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 водоемов происходит разбавление тритиевого загрязнения за счет объема водной массы серии водохранилищ. Этому способствуют значительный фильтрационный поток воды через тело плотин, наличие зон разлома земной коры по ходу русла р. Течи и пр. [Уткин; Атлас…]. Следует подчеркнуть, что установленная на основании полученных данных закономерность характерна для периода наблюдений 2007–2009 гг. и в другие годы может изменяться в зависимости от техногенной деятельности предприятия.

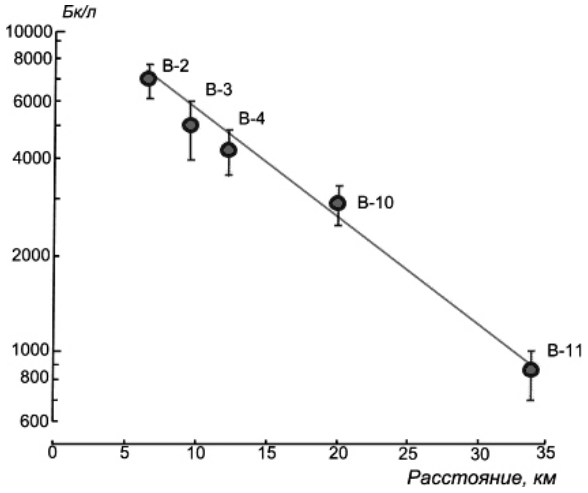

Рис. 4. Усредненные концентрации трития в воде производственных водоемов в русле р. Теча в зависимости от их расстояния до истока реки

На основании данных рассчитан примерный запас трития в водоемах, расположенных в русле р. Теча (табл. 1) [Усачев]. Общий запас радионуклида в пяти водохранилищах в период исследований составил 1,2 ПБк. Наиболее высоким запасом трития характеризуются самые многоводные водоемы – В-2 (568 ТБк), В-10 (214 ТБк) и В-11 (391 ТБк), а наиболее низкий запас зарегистрирован в водоемах В-3 и В-4.

Таблица 1

Параметры производственных водоемов в русле р. Теча и запас трития в воде в 2007–2009 гг.

Водоем	Площадь зеркала, км^2	Объем воды, млн м^3	Средняя концентрация трития в воде, Бк/л	Запас трития в водоеме, 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
Итого		393		1228

Уровни содержания трития в водоеме В-6 (Татыш), используемого оборотного технического водоснабжения предприятия, в период исследований были заметно ниже по сравнению с водоемами Теченского каскада (рис. 5). Согласно нашим данным, в период исследований концентрация радионуклида в оз. Татыш изменялась от 18 до 360 Бк/л при среднем значении 153 Бк/л.

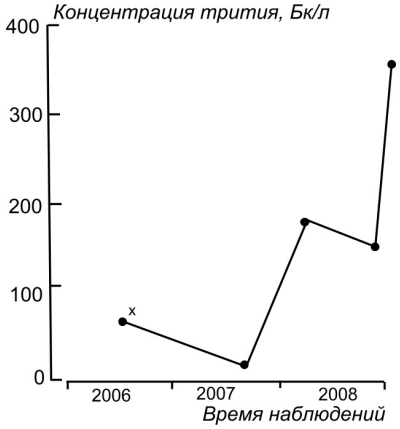

Рис. 5. Концентрации трития в воде водоема В-6, Бк/л. x – данные по [Атлас...]

Таким образом, в водоемах производственного назначения ПО «Маяк» концентрации трития в воде 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).

Несмотря на тот факт, что на предприятии производится систематический контроль за содержанием трития в водоемах 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 к снижению содержания радионуклида в воде производственных водоемов за относительно небольшой период наблюдений – от 2005 до 2009 г. (рис. 6).

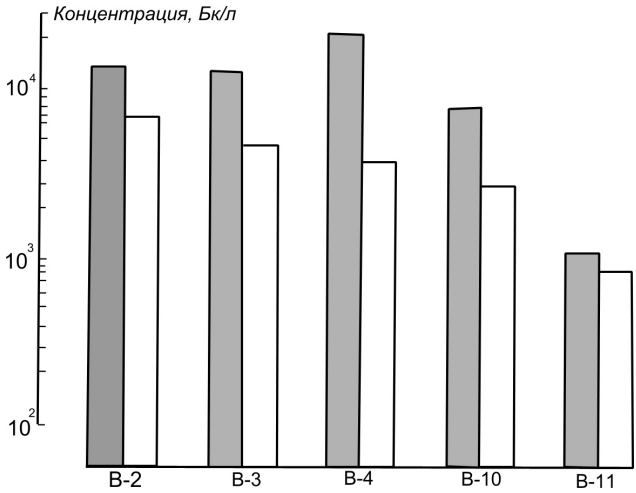

Рис. 6. Сравнение усредненных концентраций трития в водоемах Теченского каскада в разное время наблюдений. Темные столбики – 2005 г. [Атлас…; для водоема В-11 – из работы Стукалов, Алексахин, Иванов]. Светлые столбики – 2007–2009 гг. [Чеботина, 2011]

Учитывая тот факт, что производственные водоемы находятся в пределах санитарно-защитной зоны предприятия, их влияние на окружающую среду может проявиться при фильтрации загрязненной 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 населенных пунктов. В связи с этим рассчитаны уровни возможного радиационного воздействия на человека от ингаляционного поступления трития с поверхности водоемов [Екидин, Антонов, Жуковский]. Показано, что при наихудшем сценарии облучения – проведении ежедневных работ на поверхности или в непосредственной близости от водоемов – эффективная доза облучения за счет ингаляционного поступления трития в организм человека с апреля по ноябрь не превышала 0,92 мЗв. Этот результат получен для водоема В-17, который отличается от прочих производственных водоемов наиболее высокими концентрациями трития в воде [Стукалов]. Рассчитанный показатель практически не превышает предел дозы для населения (1 мЗв/год) согласно принятым в нашей стране нормативам (НРБ-99). Дополнительное облучение на расстоянии 100 м от уреза воды даже при длительном воздействии будет пренебрежимо мало.

§ 3. Водоемы комплексного назначения

Водоемы комплексного назначения в районе производственного объединения «Маяк» не подвергаются непосредственному воздействию сбросных слаборадиоактивных вод предприятия, поэтому используются для различных народно-хозяйственных целей – ловли рыбы, полива сельскохозяйственных угодий, в качестве зон отдыха населения и в ряде случаев как источники питьевого водоснабжения населения.

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

На рис. 8 результаты индивидуальных измерений концентраций трития в воде исследованных озер представлены в зави-

симости от их расстояния до предприятия. Искомые расстояния измеряли с помощью компьютерной программы Google Earth. Результаты статистической обработки данных показали, что концентрация радионуклида в воде озер снижается по мере удаления от ПО «Маяк». Обратная связь концентраций трития в воде озер с расстоянием до предприятия достоверно доказана при высоком уровне значимости (p = 0,0075).

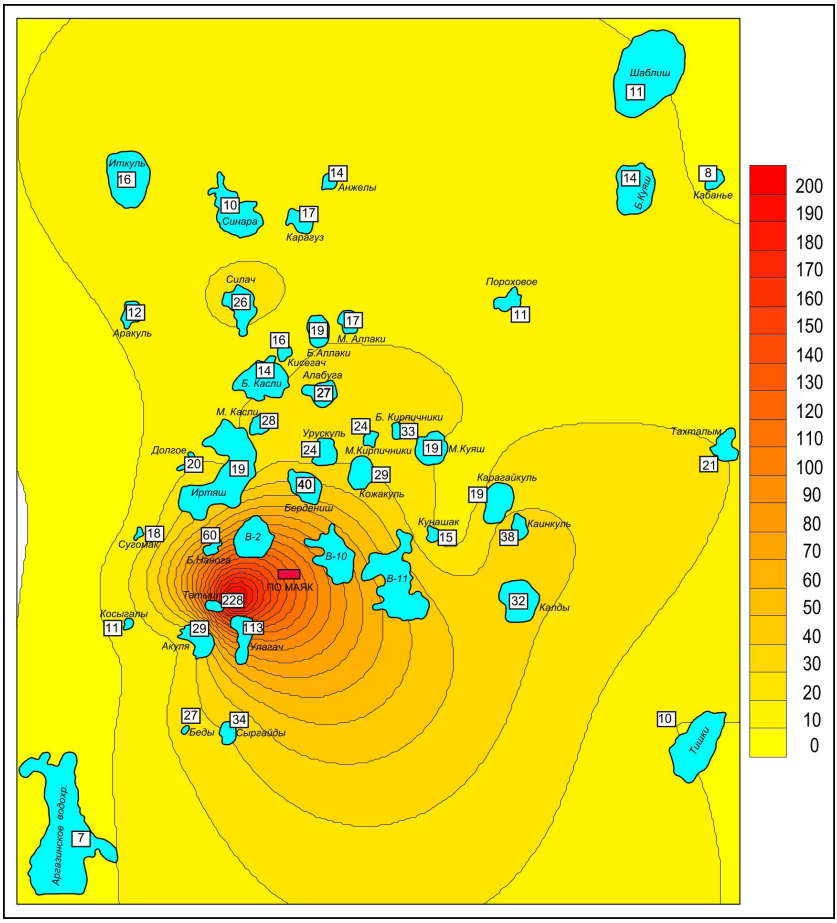

Рис. 7. Концентрации трития в водоемах комплексного назначения, Бк/л

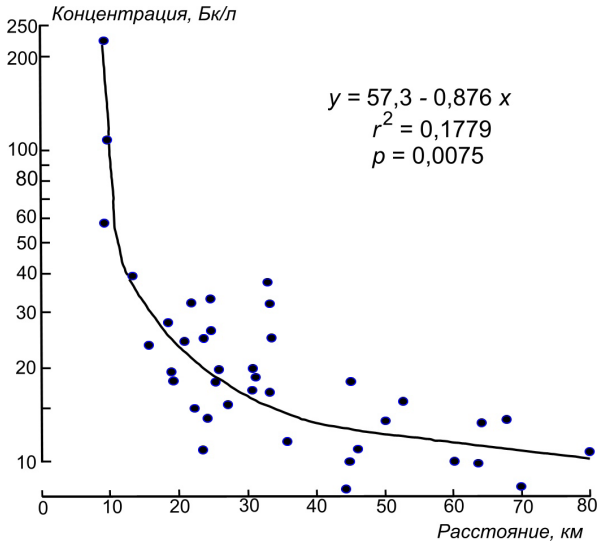

Рис. 8. Концентрации трития в водоемах комплексного назначения в зависимости от их расстояния до предприятия ПО «Маяк»

На основании результатов исследований, представленных в работах [Иваницкая, Малофеева; Чеботина, Николин, Смагин; Атлас…], сделана попытка оценить изменения в концентрациях радионуклида в воде озер во времени (1986–2006). Для сравнения были выбраны 10 озер, расположенных на разном расстоянии от предприятия (рис. 9). Результаты статистической обработки данных свидетельствуют о заметном снижении концентраций радионуклида во всех исследованных водоемах в течение указанного периода наблюдений. Для трех водоемов (Аргаяш, Большая Нанога и Кожакуль) снижение значимо ($p < 0,05$). Для остальных водоемов 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).

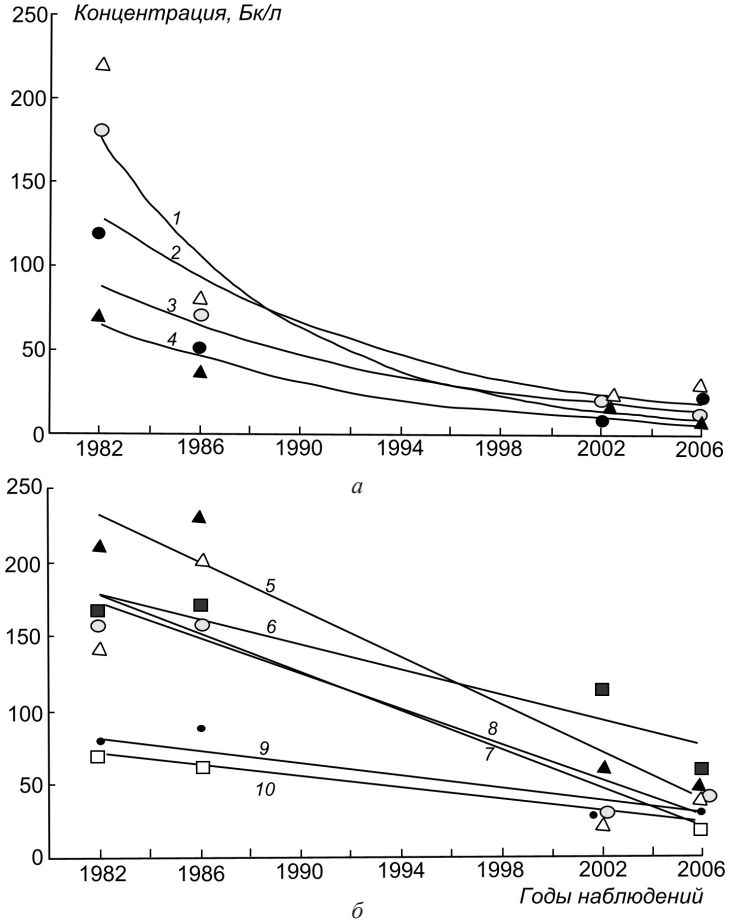

Рис. 9. Зависимость концентраций трития в воде озер от времени наблюдений: *а* – 1. Анжелы ($y = 176{,}66e^{-0{,}1295x}$; $R^2 = 0{,}967$; $p = 0{,}34$); 2. Большие Касли ($y = 130{,}61e^{-0{,}0857x}$; $R^2 = 0{,}817$; $p = 0{,}14$); 3. Б. Куяш ($y = 88{,}405e^{-0{,}0799x}$; $R^2 = 0{,}7749$; $p = 0{,}14$); 4. Синара ($y = 64{,}543e^{-0{,}0943x}$; $R^2 = 0{,}9914$; $p = 0{,}21$); *б* – 5. Нанога ($y = -8{,}0865x + 232{,}79$; $R^2 = 0{,}947$; $p = 0{,}027$); 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. Кожакуль ($y = -6{,}144x + 173{,}73$; $R^2 = 0{,}92$; $p = 0{,}039$); 9. Алабуга ($y = -2{,}22x + 82{,}154$; $R^2 = 0{,}7795$; $p = 0{,}12$); 10. Аргаяш ($y = -2{,}1x + 69{,}194$; $R^2 = 0{,}9988$; $p = 0{,}02$)

§ 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-осенее время было исследовано содержание радионуклида в дождевых осадках, собранных на двух площадках 22 завода на промышленной территории ПО «Маяк». Площадка 307 находится вблизи реакторного производства, а площадка 18 – в 2,5 км на северо-восток от нее. В качестве контроля служили осадки из окрестности г. Чебаркуль, расположенного на расстоянии 85 км от предприятия [Чеботина, Николин, Мурашова, 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. 10). За время наблюдений наиболее высокие значения (1100 и 1160 Бк/л) отмечались дважды – в июне и октябре. На 307-й площадке концентрация трития в дождевой воде варьировала от 20 до 2086 Бк/л при среднем значении 329 ± 81 Бк/л (рис. 11). Наиболее высокое значение (2086 Бк/л) было зарегистрировано в качестве единичного наблюдения в первой половине октября. На обоих площадках основная часть проб осадков (95 %) по содержанию трития не превышала 800 Бк/л. При этом средние значения концентраций радионуклида в дождевой воде на обеих площадках в 70–80 раз превышали уровень техногенного фона для Уральского региона.

Дождевые осадки в г. Чебаркуль имели значительно более низкие концентрации трития по сравнению с их значениями на промышленых площадках ПО «Маяк» (рис. 12). За исследованный период времени они изменялись в пределах 5–30 Бк/л при среднем значении 15 ± 2 Бк/л, что в три раза превышало уровень техногенного фона.

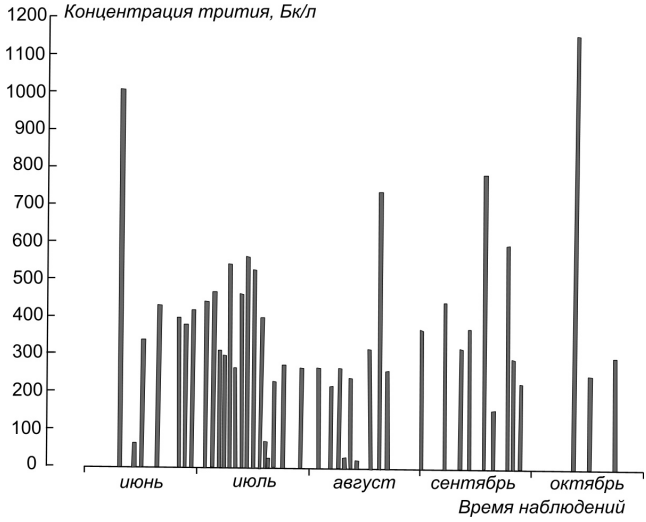

Рис. 10. Динамика концентраций трития в дождевой воде в районе 18-й площадки ПО «Маяк»

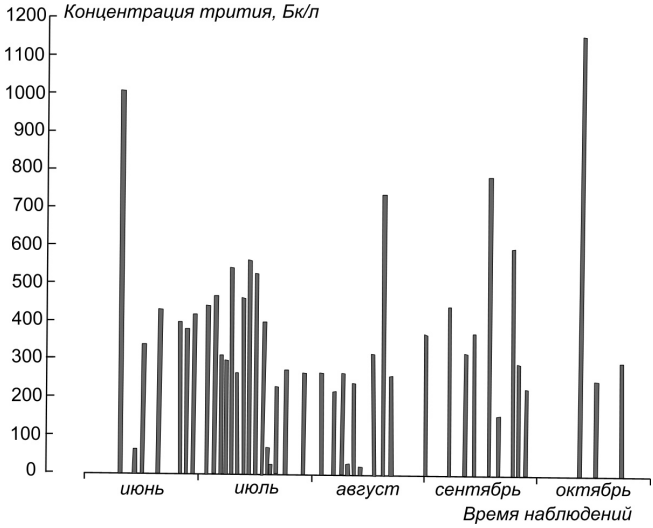

Рис. 11. Динамика концентраций трития в дождевой воде в районе 307-й площадки ПО «Маяк»

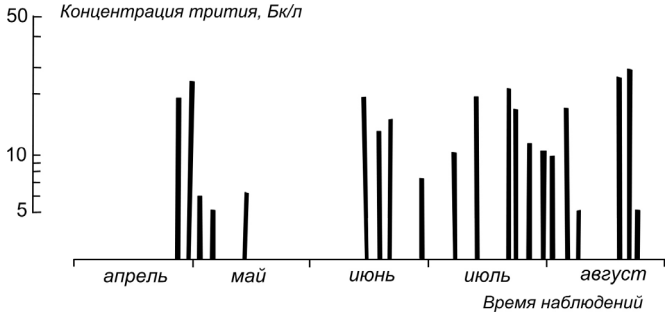

Рис. 12. Динамика концентраций трития в дождевой воде г. Чебаркуль

Исходя из полученных значений концентраций трития в дождевой воде и данных Гидрометслужбы о среднемесячном количестве осадков, в исследованных регионах было рассчитано количество трития, поступившего на земную поверхность с дождем в течение всего периода наблюдений. Для промышленной территории ПО «Маяк» и г. Чебаркуль оно составило примерно 80–100 и 7 ГБк/км^2 соответственно.

Таким образом, в районе радиохимического завода ПО «Маяк» в период исследований наблюдались повышенные значения объемной 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 более удаленной от предприятия зоне. По данным Росгидромета за 2003 г. [Радиационная обстановка…], среднегодовое содержание трития в осадках в п. Новогорный составляло 91,9 Бк/л, что в 37 раз превышало средние значения по территории РФ (2,5–2,8 Бк/л на 2003 г.) и в 18 раз – уровень техногенного фона по Уральскому региону. На расстоянии 20 км от ПО «Маяк» содержание трития в осадках уменьшалось в пять раз, но еще 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). На примере пунктов наблюдения Аргаяш, Новогорный и Касли показаны сезонные изменения в содержании 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 концентраций трития в приземном слое воздуха, связанная с уменьшением объема производства и выводом ряда реакторов из эксплуатации. Так, в 1980 г. среднегодовая концентрация радионуклида составляла 28,3 Бк/м^3, а в 1999 г. – 5,4 Бк/м^3 [Демин].

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 Ингалинской АЭС (Литва) в 1989 г. концентрация трития в осадках составляла 3,8 Бк/л [Тритий в окружающей среде…], вблизи CNRL (Канада, Онтарио, 1996 г.) – 3,7 Бк/л [Workman, Trivedi, Cornett], а в Японии – 0,5–1,7 Бк/л [Okada, Monoshima].

По абсолютным значениям концентрации радионуклида в осадках в районе реакторного производства ПО «Маяк» ниже уровня вмешательства, установленного для питьевой воды, согласно принятым нормативам [Егоров, 1996]. Однако если принять во внимание тот факт, что из воздуха при вдыхании радионуклид поступает непосредственно в организм человека, следует рассматривать повышенные концентрации трития в воздушных выбросах ПО «Маяк» в качестве негативного фактора, влияющего на здоровье людей.

§ 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 учетом разных направлений и расстояний от предприятия [Чеботина, Николин, Смагин, 2014]. В целом исследованием была охвачена территория радиусом более 30 км. На рис. 13 представлена карта-схема, указывающая местонахождение точек отбора проб и концентрацию трития в снеговой воде. Видно, что содержание радионуклида в снеге на обследованной территории изменяется в широких пределах – от 6 Бк/л до 262 Бк/л. Самый низкий показатель практически не отличается от уровня техногенного фона, а наиболее высокий – превышает

этот показатель более чем в 50 раз. Повышенные значения концентраций обнаружены в непосредственной близости от предприятия.

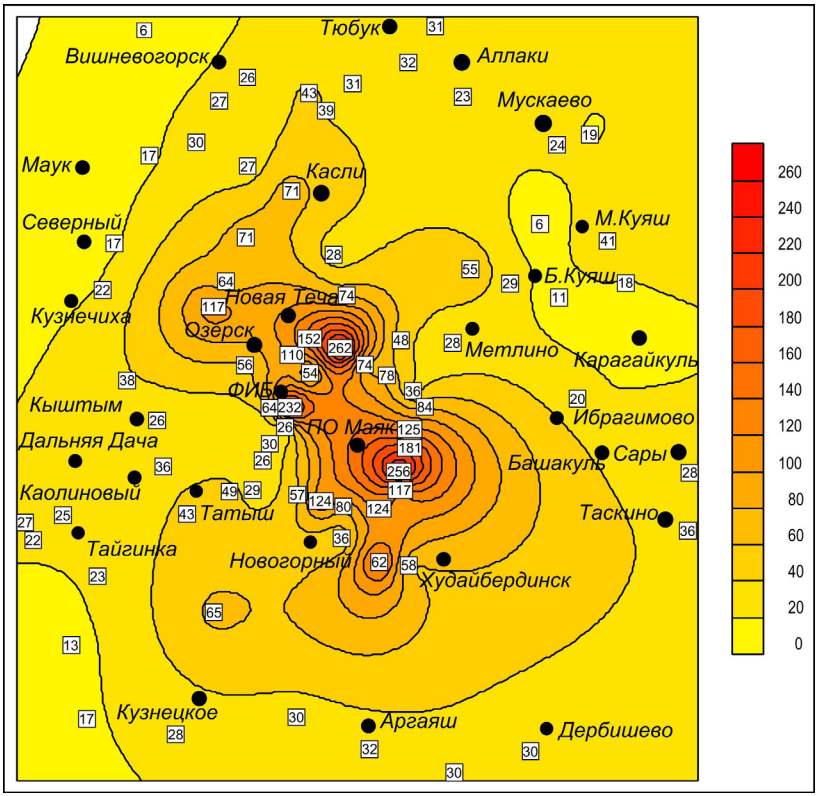

Рис. 13. Концентрации трития в воде из снега в районе ПО «Маяк», Бк/л

Для того чтобы определить, как изменяется концентрация радионуклида в пробах снега в зависимости от расстояния до предприятия, были усреднены показатели для территорий, расположенных на разных расстояниях вокруг ПО «Маяк» – 0–10 км, 10–20 км, 20–30 км и более 30 км. При этом расположение точек отбора по сторонам света не учитывали. Из данных рис. 14 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 два раза (65 ± 12 Бк/л),

на расстояниях 20–30 км – 48 ± 5 Бк/л, 30–40 км – 44 ± 2 Бк/л и более 40 км – 25 ± 2 Бк/л. Результаты статистической обработки всей совокупности данных показали, что снижение концентрации радионуклида в снеговой воде в зависимости от расстояния до предприятия достоверно при высоком уровне значимости ($p << 0,05$).

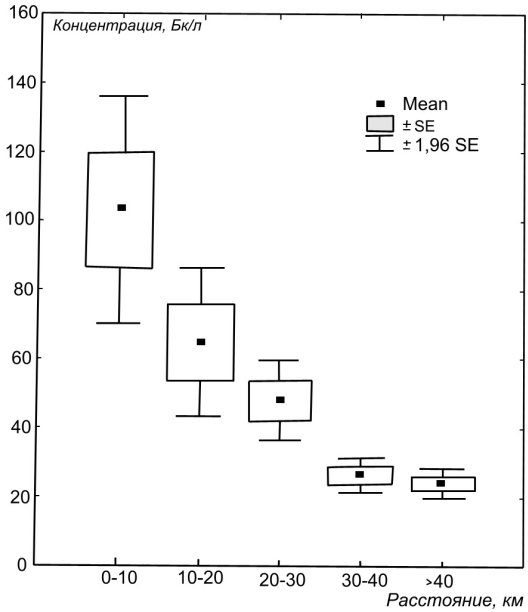

Рис. 14. Изменение средних концентраций трития в снеговой воде в зависимости от расстояния до ПО «Маяк»

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. 15).

Указанное выше распределение концентраций трития в снежном покрове ближней зоны ПО «Маяк» в значительной

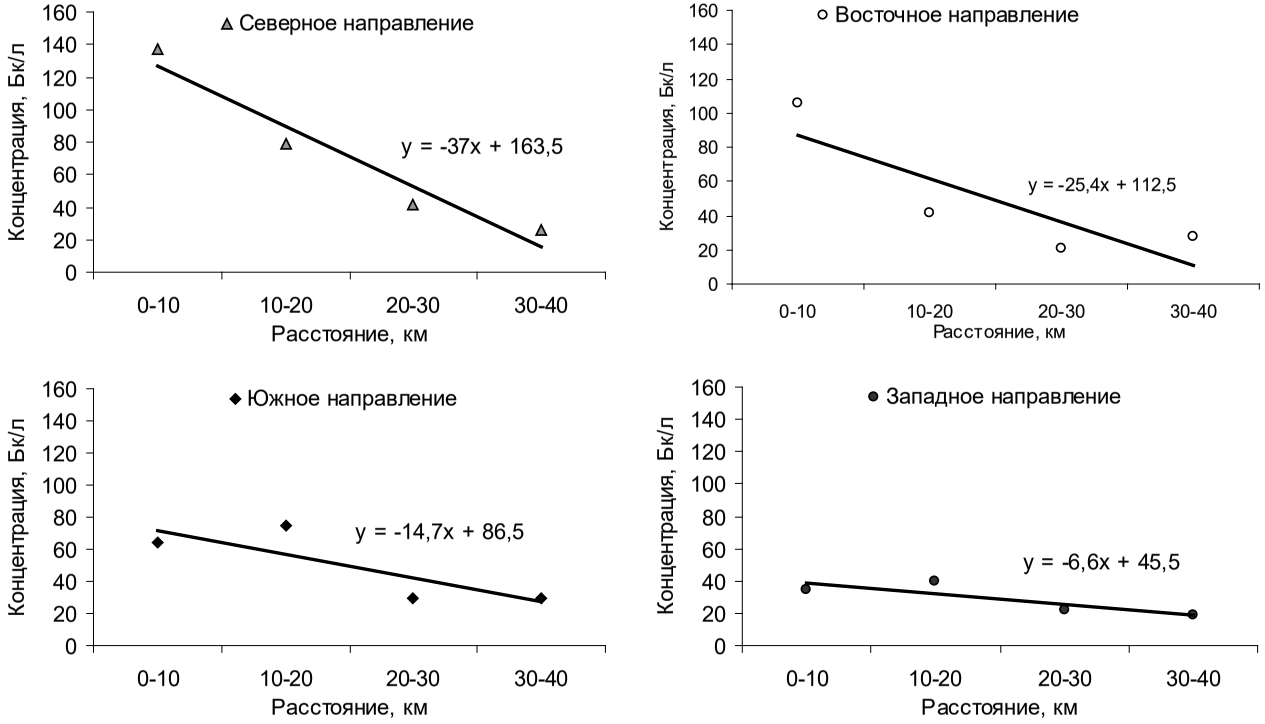

Рис. 15. Концентрации трития в снеговой воде в зависимости от направления от ПО «Маяк», Бк/л

степени может быть связано с преобладающим направлением ветров, которое формируется горным массивом Центрально-Уральского поднятия, расположенного на юго-запад от предприятия (рис. 16). 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…; Использование модели…].

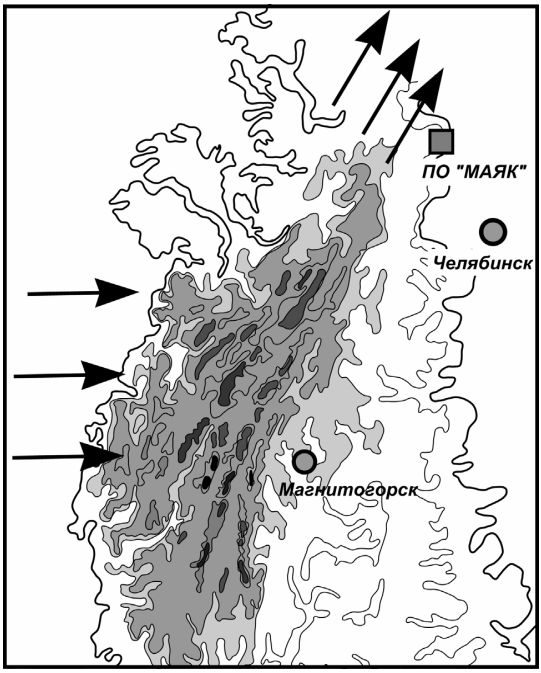

Рис. 16. Схема формирования розы ветров в районе ПО «Маяк»

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.

§ 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 концентраций трития в различных типах источников питьевой воды в 45-километровой зоне вокруг ПО «Маяк» [Тритий в воде колодцев…; Чеботина, Николин, Смагин, 2008; Чеботина].

Личные колодцы и скважины. На рис. 17 представлены значения концентраций трития в воде колодцев и личных скважин в пределах обследованной территории. Глубина колодцев варьировала от 2 до 10 м, а скважин – от 6 до 40 м. На рисунке видно, что содержание трития в воде колодцев изменялось от уровня техногенного фона до 24 Бк/л, а скважин – до 78 Бк/л. Ареал повышенных концентраций трития выявлен к северу от промзоны ПО «Маяк» (в последней пробы не отбирались), между пунктами Метлино – Новая Теча – Касли – Пригородный. Карта-схема также указывает на возможность наличия подобного ареала еще 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. 18). Заметим, что глубину личных скважин мы получали от их владельцев, поэтому в этой информации 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

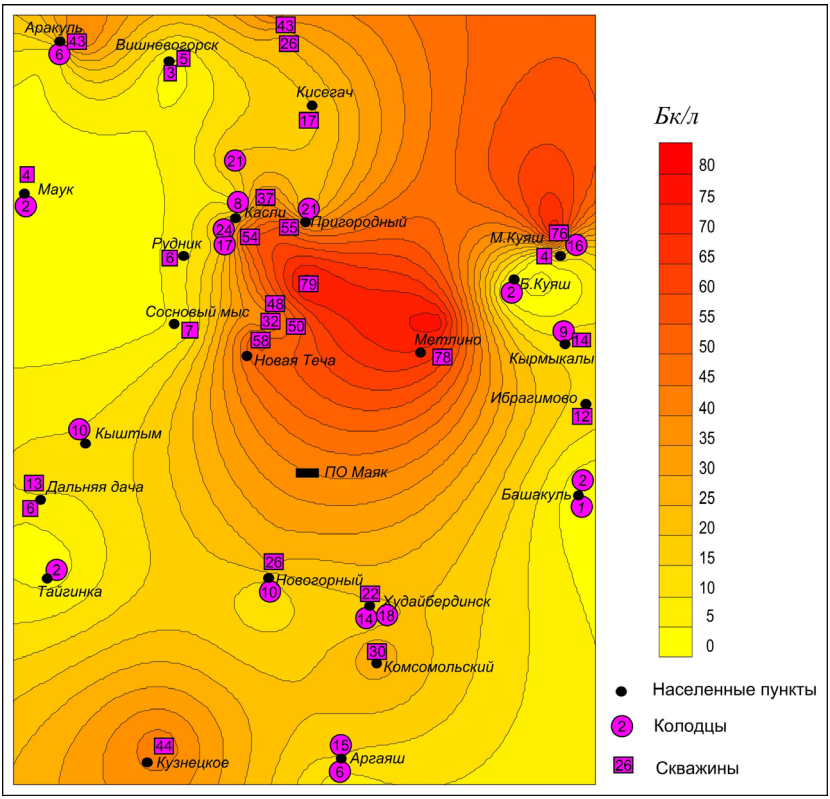

Рис. 17. Концентрация трития в воде колодцев и личных скважин в районе ПО «Маяк», Бк/л

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 водоемов-отстойников теченского каскада, а в южном и восточном направлениях находятся водоемы В-9 (Карачай) и В-17 (Старое Болото) с концентрацией трития в диапазоне 10^3–10^6 Бк/л, очевидно, что они являются возможным источником загрязнения питьевой воды колодцев и личных скважин в указанном регионе.

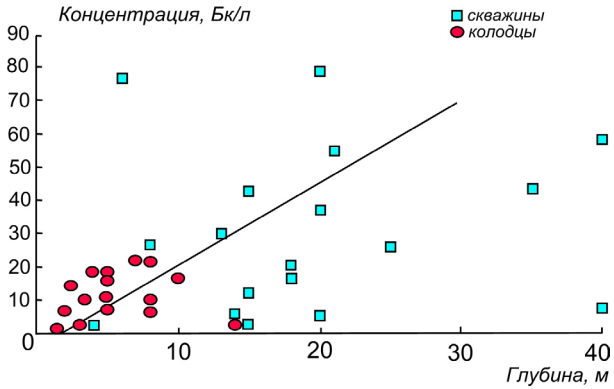

Рис. 18. Корреляционная связь между содержанием трития в воде колодцев и скважин зоны воздействия ПО «Маяк» и их глубиной

Источники централизованного водоснабжения. Значительная часть населения района ПО «Маяк» использует воду из централизованных источников. В разных населенных пунктах она подается в водопроводную сеть из различных природных резервуаров. В одних случаях это специально пробуренные артезианские скважины, в других – открытые водоемы (оз. Аракуль, оз. Иртяш, оз. Сугамак, Зацепинский пруд). Поэтому содержание трития в водопроводной воде разных населенных пунктов зависит от радиационной чистоты соответствующих водных источников.

Таблица 2

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

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

Окончание табл. 2

Пункт наблюдений	Концентрация трития, Бк/л
Маук	6
Аргаяш	2
Рудник	6

Примечание: * Разное время наблюдений.

Из данных таблицы 2 видно, что содержание трития в воде центрального водоснабжения в исследованных населенных пунктах варьирует от уровня техногенного фона до 60 Бк/л. Наиболее низкие значения отмечены для населенных пунктов Аргаяш, Маук, Рудник, а наиболее высокие – для населенных пунктов Касли, Новогорный, Худайбердинск, Кызылбулак, Вишневогорск.

Родники. Родники представляют собой естественные выходы подземных вод на поверхность Земли. Количество и качество родниковой воды зависит от дебита и глубины залегания водоносного горизонта. Экологическая чистота родниковой воды 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 девять родников, концентрации трития в которых варьировали от уровня техногенного фона до 44 Бк/л. Приведенные на рис. 19 изолинии

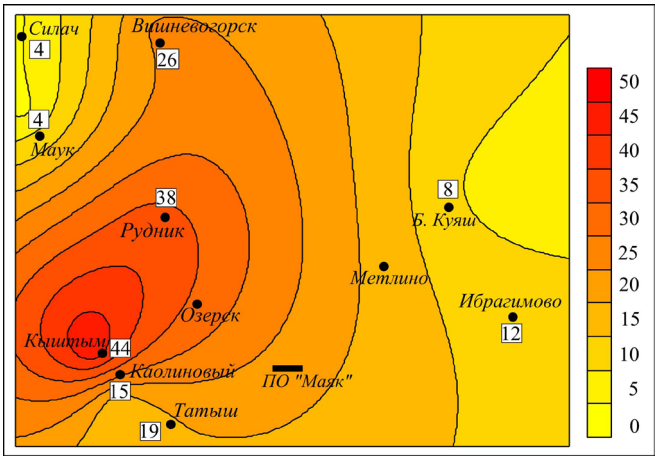

Рис. 19. Уровни содержания трития в родниковой воде, Бк/л

свидетельствуют о наличии повышенных концентраций радионуклида в родниковой воде в зоне, приближенной к ПО «Маяк» (Кыштым, Рудник, Татыш) и меньшими значениями в более удаленном районе (Силач, Маук, Куяш, Ибрагимово).

§ 7. Водная экосистема р. Теча

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

Река Теча берет свое начало из оз. Иртяш, сток воды из озера в реку зарегулирован плотиной П-1. Как отмечалось выше, в период строительства и функционирования ПО «Маяк» в верхней части русла р. Теча была создана система гидротехнических сооружений, включающих каскад производственных водоемов, плотины и обводные каналы. Ниже места впадения в реку обводных каналов р. Теча на значительном расстоянии протекает по широкой долине с множеством болот. Большую территорию занимают болота в районе населенного пункта Асаново (Асановские болота) общей протяженностью ~10 км и шириной ~2 км. Русло реки в этом районе выражено нечетко, река протекает небольшими протоками. В среднем и нижнем течении (от с. Муслюмово и ниже) она расширяется и углубляется, приобретает четкое умеренно-извилистое русло с плесами 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; 2002б].

Район исследования (рис. 20) включал р. Теча в среднем и нижнем ее течении от с. Муслюмово до с. Затеченское, а также населенные пункты, расположенные по берегам реки и по трансекте от р. Теча до д. Барабановское на левом берегу реки.

Мониторинг трития в р. Теча в районе с. Муслюмово в период 2005–2009 гг. (рис. 21) показал, что в разные периоды наблюдений концентрация радионуклида в воде варьировала в широких пределах – от 30 до 600 Бк/л при среднем значении 250 Бк/л.

Рис. 20. Карта-схема расположения точек отбора проб в районе р. Теча

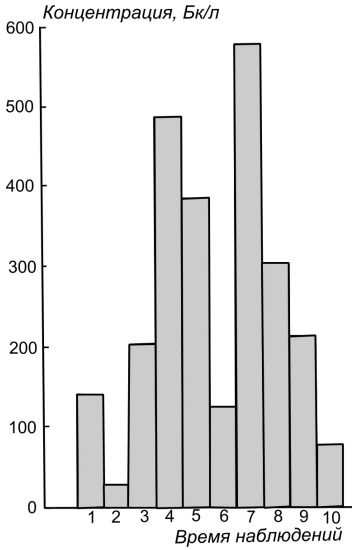

Рис. 21. Содержание трития в воде р. Теча в районе н. п. Муслюмово в разные периоды наблюдений: 1 – 1.06.05; 2 – 8.08.07; 3 – 5.12.07; 4 – 27.05.08; 5 – 26.09.08; 6 – 9.12.08; 7 – 10.12.08; 8 – 14.01.09; 9 – 13.03.09; 10 – 29.06.09

На рис. 22 представлены концентрации трития в воде р. Теча на разном расстоянии от плотины П-11, полученные в 2005 и 2010 гг. Видно, что среднее содержание радионуклида в речной воде в указанные периоды наблюдений было примерно одинаково и в целом снижалось на исследуемом участке реки от 130 до 70 Бк/л. Приведенные на рисунке данные свидетельствуют о том, что р. Теча на всем своем протяжении несет повышенные концентрации радионуклида, превышающие уровень техногенного фона в среднем от 10 до 30 раз. Однако в отдельные периоды наблюдений превышение уровня техногенного фона достигало 100 и более раз [Чеботина, Николин, 2015; Chebotina, Nikolin, Bondereva].

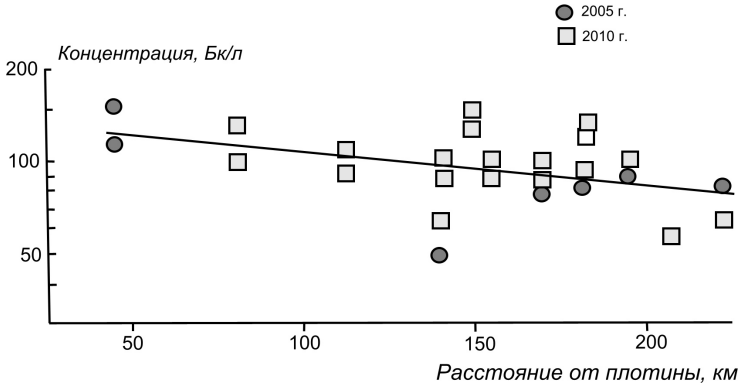

Рис. 22. Уровни концентраций трития в воде р. Теча на разном расстоянии от плотины П-11

В связи с постоянным потоком повышенных концентраций трития с водами р. Теча представляло интерес определить, как влияет ее загрязнение на содержание радионуклида в питьевой воде населения, проживающего в прибрежной зоне. Известно, что в соответствии с программой реабилитации загрязненной территории для снижения поступления радионуклидов в питьевую воду жителей в населенных пунктах, расположенных вдоль загрязненной реки, были пробурены глубинные скважины (до 100–180 м), из которых вода подается в колонки, расположенные на территории этих населенных пунктов (сетевая вода). Вместе с тем население употребляет воду колодцев, родников и личных скважин меньшей глубины.

Для оценки содержания трития в воде различных питьевых источников, расположенных в пойме р. Теча, в 2005–2010 гг. производили отбор проб воды в следующих населенных пунктах: Муслюмово (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 питьевых вод, используемых 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, имеющих меньшую глубину. В среднем различие составило 2–3 раза (рис. 23). 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. 24) 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 $p = 0{,}0016$).

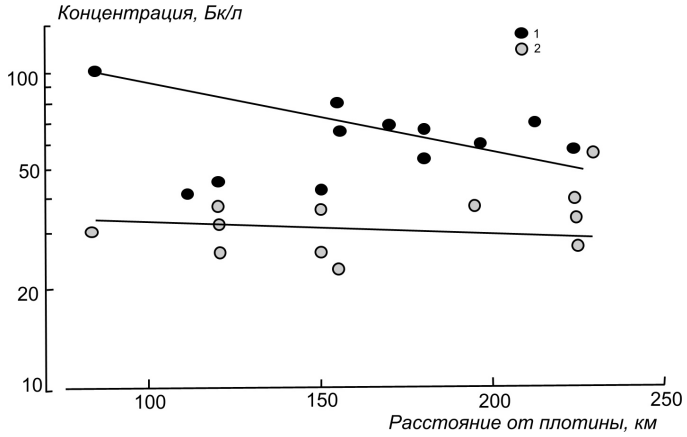

Рис. 23. Уровни содержания трития в источниках питьевого водоснабжения жителей населенных пунктов, расположенных в пойме р. Теча. 1 – сетевая вода; 2 – вода личных скважин, колодцев, родников

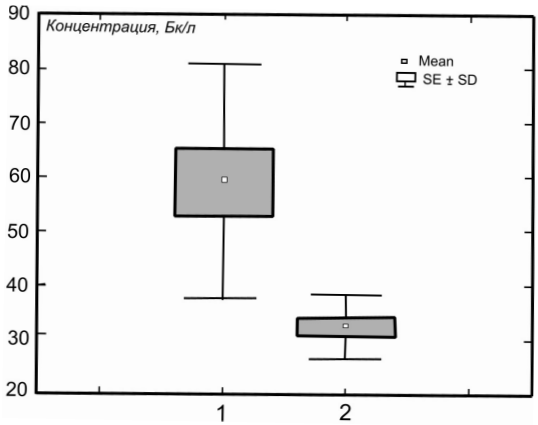

Рис. 24. Результаты статистической обработки данных по питьевым водам в населенных пунктах, расположенных в пойме р. Теча: 1 – сетевая вода; 2 – вода личных скважин, колодцев, родников

Повышенное содержание трития в сетевой воде, поступающей из глубинных скважин, по всей вероятности, объясняется тем, что русло р. Теча расположено в зоне разлома земной коры, по которому идет фильтрация загрязненной радионуклидом воды из производственных водоемов, расположенных в верхней части зарегулированного русла реки [Уткин; Атлас…]. Как показано выше, вода производственных водоемов, расположенных в русле р. 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 водоемов и их расстоянием до истока реки (рис. 4), а также наличие аналогичной связи между концентрациями радионуклида в сетевой воде населенных пунктов, расположенных в пойме р. Теча, и их расстоянием от плотины П-11 (рис. 23) подтверждает тот факт, что производственные водоемы и р. Теча объединены в единую гидрогеологическую сеть, по которой вниз по течению происходит подземная глубинная фильтрация загрязненных 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.

В отличие от глубинных вод, имеющих связь с производственными водоемами, воды других питьевых источников (колодцев, менее глубоких личных скважин), расположенных в пойме р. Теча, подпитываются отчасти за счет воды р. Теча, 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 р. Теча. Для этой цели были обследованы водные источники в пунктах наблюдений, расположенных на левом берегу реки по трансекте между населенным пунктом Барабановское и р. Теча (рис. 20). 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; Иксанова – 68 м; Нижняя – 33 м). Значения концентраций трития в различных питьевых источниках в зависимости от их расстояния до русла р. Теча представлены на рис. 25. 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, расположенных в пойме реки (рис. 23).

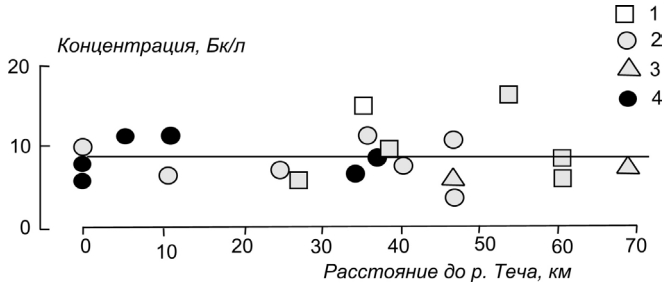

Рис. 25. Содержание трития в воде питьевых источников, расположенных по трансекте на разном расстоянии от русла р. Теча: 1 – колодцы; 2 – личные скважины глубиной до 20 м; 3 – родники; 4 – сетевая вода и частные скважины глубиной >30 м

Таким образом, повышенные концентрации радионуклида в воде глубинных источников отмечены лишь в пойме р. Теча. Из приве-

денных выше данных 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.

§ 8. Водная экосистема р. Мишеляк

Река Мишеляк берет свое начало из оз. Улагач, далее проходит по южной границе санитарно-защитной зоны ПО «Маяк» и впадает в правобережный обводной канал. Река перекрывает поток фильтрационных вод в южном направлении от производственных водоемов ПО «Маяк». Считается, что основным поставщиком тритиевого загрязнения этой территории являются водоемы В-9 и В-17 (рис. 26).

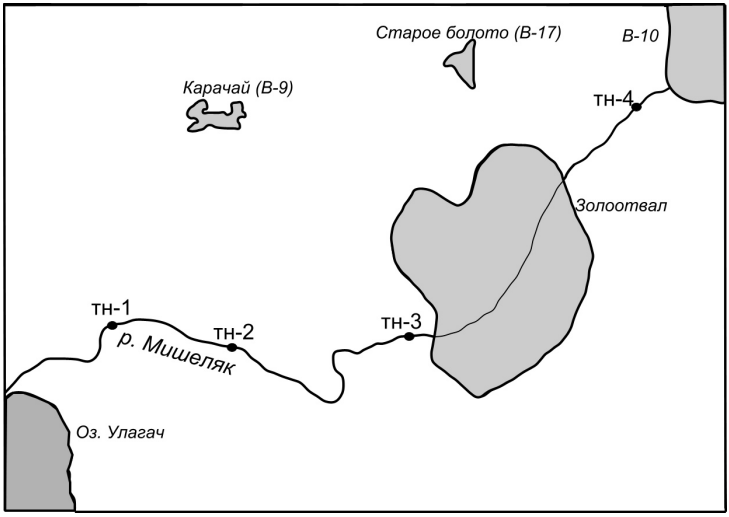

Рис. 26. Схема расположения точек наблюдений (тн) в русле р. Мишеляк

Наличие разломов земной коры и других гидрогеологических нарушений на территории создает предпосылки для проникновения фильтрующихся из производственных водоемов вод в водоносные горизонты в интервале глубин до 100–150 м и распространения их в северном и южном направлениях [Иваницкая, Малофеева]. Миграция загрязненных вод, поступивших в подземные

горизонты, происходит в соответствии со структурой потока, водоносностью и трещиноватостью пород. Для изучения химического состава поверхностных и подземных вод, скорости продвижения потока загрязнения на ПО «Маяк» создана режимная наблюдательная сеть, которая включает более 3 000 действующих и законсервированных скважин, пробуренных с 1942 по 2005 гг. [Атлас…].

Исследование концентраций трития в воде р. Мишеляк проводили в период 2007–2009 гг. (рис. 27). 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 пять 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 р. Теча.

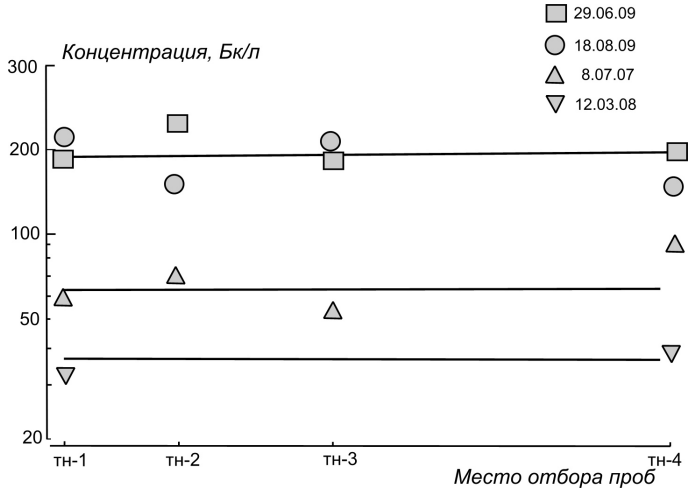

Рис. 27. Уровни концентраций трития в воде р. Мишеляк в разные сроки наблюдений

На рис. 28 представлены уровни концентраций радионуклида в глубинных скважинах, расположенных в пойме р. Мишеляк. В исследованных скважинах содержание трития варьировало

от 9 до 423 Бк/л при среднем значении 100 ± 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 внутрипочвенных водах в южном направлении от производственных водоемов ПО «Маяк» могут служить источником тритиевого загрязнения питьевых вод п. Новогорный, Кызылбулак и Худайбердинский.

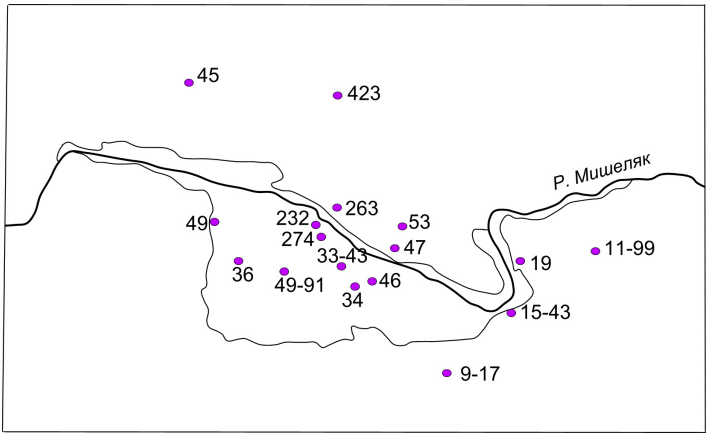

Рис. 28. Содержание трития в воде скважин наблюдения в пойме р. Мишеляк, Бк/л

§ 9. Организм человека

При всех способах попадания в организм тритиевая вода легко проникает в плазму крови и приходит в равновесие со всеми жидкостями тела. Основной путь контроля эффективной дозы внутреннего облучения людей от трития предполагает исследование содержания радионуклида в моче или конденсате паров воды от вдыхаемого воздуха [Тритий и его соединения…; Баллонов, Чипига; Тритий в моче людей…]. Поэтому изучение закономерностей поступления трития в организм человека в районах размещения предприятий ЯТЦ является важной научной и практической задачей.

Местом проведения исследования служила территория, расположенная в разных направлениях и на разном расстоянии от

ПО «Маяк». В работе использована моча, собранная 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. Кроме того, в отдельных случаях в 2010–2011 гг. отбирали пробы мочи непосредственно у жителей г. Озерска, не работающих на ПО «Маяк» [Чеботина, Николин, 2012].

Как видно на рис. 29, 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. Озерска, п. Татыш и Кыштым, расположенных наиболее близко от предприятия, а наиболее низкие – для относительно удаленных территорий 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.

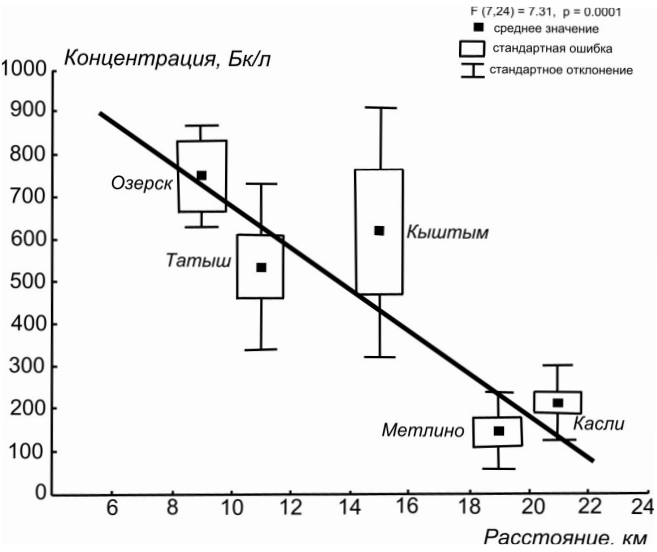

Рис. 29. Уровни содержания трития в моче людей различных пунктов наблюдений зоны воздействия ПО «Маяк», Бк/л

Учитывая тот факт, что уровни содержания трития в питьевой воде района ПО «Маяк» сравнительно невысокие (см. § 6), можно предположить, что основным источником поступления радионуклида в организм жителей рассматриваемого региона являются воздушные выбросы предприятия.

В таблице 3 приведены величины индивидуальных доз внутреннего облучения от трития, рассчитанные по данным 2008 г., для людей, проживающих в исследованных пунктах наблюдения. Как видно из данных таблицы, они колеблются в пределах 3–14 мкЗв/год и составляют 0,3–1,4 % от предела дозы для населения (1 мЗв/год) (НРБ-99/2009).

Таблица 3

Индивидуальные дозы облучения людей за счет поступившего в организм трития

Пункт наблюдения	Доза облучения, мкЗв/год
Озерск	13,7
Кыштым	11,4
Татыш	10,3
Касли	4,0
Метлино	2,9

§ 10. Район г. Озерска

В районах размещения крупных ядерных объектов необходимо исследование радиоэкологической обстановки в городах, где проживает население. Таким городом является Озерск, возникновение которого (1945 г.) тесно связано с реализацией Атомного проекта СССР и строительством первого в стране предприятия атомной промышленности – ПО «Маяк». Озерск расположен в Челябинской области на берегу оз. Иртяш. Площадь города – 657,32 км², население на 2018 г. – 83 217 человек. На примыкающей к городу территории расположены озера Большая и Малая Нанога и промышленный водоем Кызылташ. У северо-восточной окраины города протекает р. Теча (рис. 30).

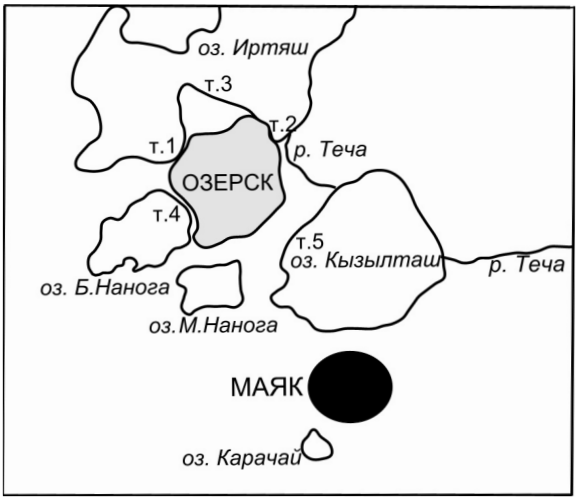

Рис. 30. Карта-схема расположения точек наблюдений в районе г. Озерска: т. 1 – оз. Иртяш, б/о «Отважный»; т. 2 – оз. Иртяш в истоке р. Теча; т. 3 – место забора воды для снабжения г. Озерска питьевой водой (водопровод города); т. 4 – оз. Б. Нанога; т. 5 – оз. Кызылташ

Объектами исследования в г. Озерске и на прилегающей к нему территории служили дождевые и снеговые осадки, вода озер Иртяш, Большая Нанога и истока р. Теча, водопроводная вода города, лед из холодильника, моча людей.

Дождевые осадки. На рис. 31 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 соответственно ~ 100 км на юго-восток и 120 км на юг от Озерска. Среди указанных пунктов наблюдений наиболее высокие концентрации трития регистрировались 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 ± 1,5 Бк/л) было почти в пять раз меньше, чем в Озерске (разброс данных индивидуальных измерений от 5 до 28 Бк/л). В г. Екатеринбурге дождевые и снеговые осадки в 2013 г. содержали примерно в четыре раза меньше трития, чем осадки г. 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.

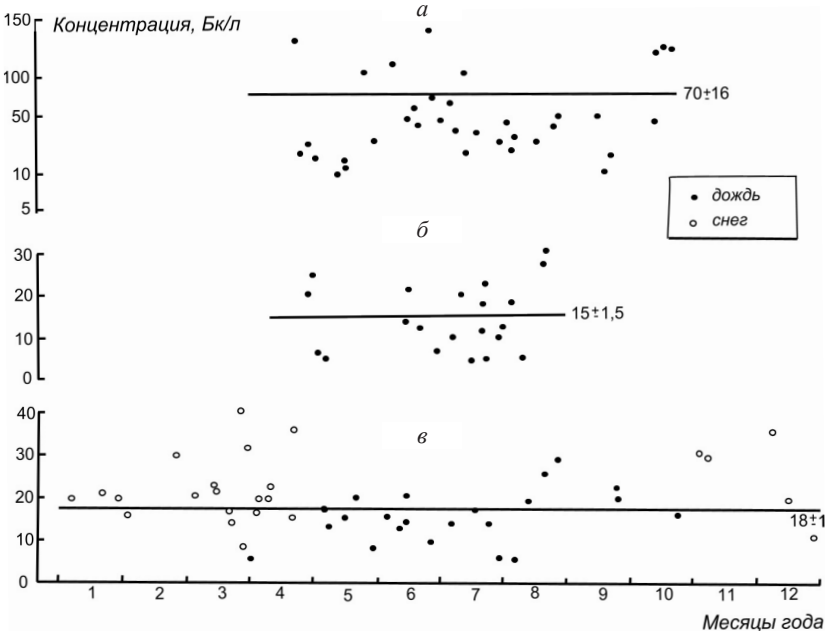

Рис. 31. Уровни концентраций трития в атмосферных осадках городов: *а* – Озерск, 2007 г.; *б* – Чебаркуль, 2007; *в* – Екатеринбург, 2013 г.

Снег. На рис. 32 представлены значения концентраций трития в снежном покрове разных мест территории г. Озерска в 2005 г. На рисунке видно, что содержание радионуклида в снеговой воде варьирует от 28 до 152 Бк/л при среднем значении 54 ± 13 Бк/л. Полученные данные превышают уровень техногенного фона для Уральского региона от 5 до 30 раз.

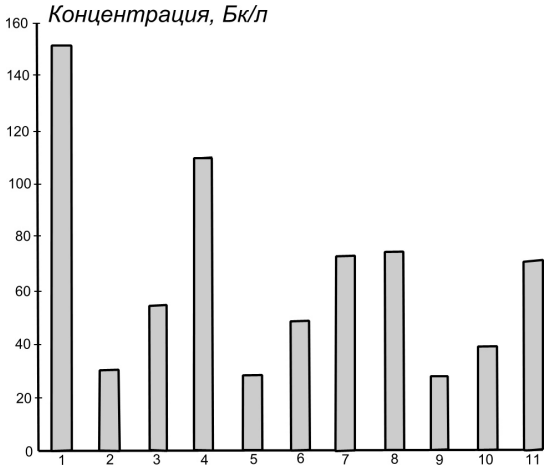

Рис. 32. Средние концентрации трития в снеговой воде г. Озерска в различных точках наблюдений. 1–11 – точки наблюдений в пределах территории города

Озера. В табл. 4 приведены концентрации трития в воде озер, расположенных в периферийной зоне г. Озерска. Из них оз. Иртяш (площадь ~ 60 км^2, глубина – 12–22 м) – одно из самых крупных озер Челябинской области. Озеро является источником питьевого водоснабжения жителей г. Озерска и основным поставщиком воды для нужд ПО «Маяк». Водоем используется для отдыха и водоснабжения населения, рыборазведения и любительской ловли рыбы, на западном берегу озера находится большое количество баз отдыха. Согласно единичным данным, содержание трития в воде оз. Иртяш составляет 18–21 Бк/л, что примерно в четыре раза выше уровня техногенного фона для Уральского региона.

Оз. Большая Нанога (площадь – 5,3 км^2, средняя глубина – 4,2 м) примыкает с юго-запада к г. Озерску. Озеро соединено протоками с оз. Иртяш. В результате сброса в водоем промышленных и бытовых стоков г. Кыштым вода в нем загрязнена тяжелыми металлами, фосфатами, марганцем и прочими химическими веществами. Согласно данным за 2016 г., концентрация трития в воде оз. Большая Нанога составляла 32 ± 1 Бк/л, что примерно в шесть раз превышает уровень техногенного фона.

Оз. Кызылташ (площадь – 19 км^2, средняя глубина – 3,4 м) – водоем – охладитель прямоточных ядерных установок ПО «Маяк». Расположено примерно в двух км от г. Озерска. Наряду с техно-

логическим сбросом теплых вод в озеро 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 оз. Кызылташ в зависимости от времени наблюдений варьировало от 3187 до 15300 Бк/л при среднем значении 6330 ± 1120 Бк/л.

Таблица 4

Уровни концентраций трития в воде озер Иртяш, Большая Нанога, Кызылташ

Название водоема	Дата отбора	Концентрация трития, Бк/л
Оз. Иртяш (рис. 30, т. 1)	29.05.2007	18,6 ± 0,9
«	05.2016	17,9 ± 0,6
«	05.2016	21,0 ± 0,8
Оз. Большая Нанога (рис. 30, т. 4)	05.2016	32,5 ± 1,1
Оз. Кызылташ (рис. 30, 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 намороженная вода. При рассмотрении источников поступления трития в питьевую воду жителей г. Озерска следует подчеркнуть, что вода в жилые помещения г. Озерска подается из оз. Иртяш (рис. 30, т. 3). Исследование концентраций трития в водопроводной воде жилых домов и воде из намороженного в хо-

лодильнике льда (табл. 5) показало, что содержание радионуклида в обоих случаях варьирует от 10 до 150 Бк/л, однако средние значения концентраций трития в воде из намороженного льда оказались примерно в два раза выше (97 ± 20 Бк/л), чем в водопроводной воде (44 ± 7 Бк/л). Статистическая обработка данных показала, что это различие достоверно ($p = 0{,}003$). Двукратное различие по содержанию радионуклида в водопроводной воде и намороженной ледяной массе можно объяснить разными источниками поступления в них трития. В процессе намораживания радионуклид попадает в лед из воздуха, а в водопроводную воду он поступает преимущественно из оз. Иртяш. Приведенные на рис. 31 и в работе [Чеботина, Николин, Мурашова] данные позволяют предположить, что воздушные выбросы ПО «Маяк» являются одним из основных источников загрязнения территории города тритием.

Таблица 5

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

Объект исследования	Время отбора пробы	Концентрация трития, Бк/л
Водопроводная вода	31.01.2002	21,1 ± 4,6
«	24.02.2002	22,8 ± 0,2
«	24.03.2002	18,0 ± 0,4
«	07.2003	47,1 ± 0,6
«	18.05.2004	35,1 ± 0,7
«	06.2004	43,2 ± 0,4
«	1.04.2005	50 ± 2
«	03.2010	10,4 ± 0,9
«	04.2010	115,2 ± 32,0
«	05.2010	154,2 ± 83,5
«	06.2010	86,8 ± 44,5
«	07.2010	53 ± 12
«	08.2010	38,6 ± 4
«	09.2010	94,9 ± 40
«	10.2010	93,9 ± 14
«	11.2010	28,2 ± 1,7
«	12.2010	36,7 ± 0,8

Окончание табл. 5

Объект исследования	Время отбора пробы	Концентрация трития, Бк/л
«	01.2011	23,5 ± 2
«	02.2011	27,1 ± 1,7
«	03.2011	10,2 ± 0,5
«	04.2011	24,2 ± 2,6
«	05.2011	19,5 ± 1,9
«	06.2011	39,4 ± 2,7
«	07.2011	34 ± 1,3
«	08.2011	19,1 ± 0,3
«	05.2016	9,7 ± 0,3
Среднее		44 ± 7
Лед из холодильника	31.05.2004	87,1 ± 0,5
«	02.2010	107 ± 18
«	03.2010	120,2 ± 48,2
«	05.2010	107,8 ± 17,6
«	06.2010	149,2 ± 47,1
«	07.2010	10,7 ± 3
«	08.2011	87,1 ± 0,5
Среднее		97 ± 20

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

Согласно результатам, представленным в табл. 6, содержание трития в истоке р. Теча в период наблюдений варьировала 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. Сравнение усредненных результатов, представленных в табл. 5 и 6, показало, что в т. 2 концентрация трития примерно на 40 % выше, чем в питьевой воде, местом забора которой служит т. 3 озера Иртяш. Ука-

занное различие статистически достоверно ($p = 0,04$). Возможным объяснением этого может быть то обстоятельство, что т. 2 расположена ближе к оз. Кызылташ, чем т. 3. В связи с этим возможен подток загрязненной тритием воды из глубинных водоносных горизонтов, расположенных под Буферным водоемом и оз. Кызылташ. Кроме того, испарение воды с поверхности водоема-охладителя, содержащего повышенные концентрации радионуклида, может вносить определенный вклад в надфоновое загрязнение тритием указанной зоны оз. Иртяш.

Таблица 6

Уровни концентраций трития в воде истока р. Теча

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

Моча людей. Содержание трития в моче людей в районах расположения предприятий ЯТЦ может различаться в зависимости от времени наблюдений, возраста, места работы, места прожива-

ния, режима работы предприятия и прочих факторов. Согласно данным, у детей г. Озерска в период с 1980 по 1998 г. концентрация трития составляла в среднем 1140–1460 Бк/л, а на прилегающих территориях (Касли, Тюбук) – 810–1160 Бк/л [Демин]. В 2001 г. у взрослых мужчин и женщин г. Озерска, не работающих на предприятии, содержание радионуклида в моче находилась на уровне 126 ± 10 Бк/л, при этом оно не различалось у лиц мужского и женского пола [Мурашова, Чудин]. Согласно нашим данным, полученным в 2008–2009 гг. для произвольной выборки из числа жителей г. Озерска, содержание радионуклида в моче изменялось в широком диапазоне концентраций, 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. Сравнение концентраций радионуклида в моче жителей г. Озерска и Заречного, расположенного в зоне воздействия Белоярской АЭС, свидетельствует о том, что в первом случае они заметно выше (табл. 7).

Таблица 7

Уровни концентраций трития в моче жителей городов Озерска и Заречного

Место наблюдений	Год наблюдений	Концентрация трития, Бк/л
г. Озерск	2008	1260
«	«	998
«	«	836
«	«	668
«	2010	67 ± 6*
«	«	49 ± 2*
«	«	37*
«	«	56*
«	«	130 ± 15
г. Заречный (среднее значение)	2006–2015	42 ± 8

Примечание: * Показатели у жителей Озерска, не работающих в период исследований на ПО «Маяк».

Отмеченное в работе снижение концентраций трития в моче выборки из числа взрослых жителей г. Озерска (22 человека) до 18 ± 1 Бк/л по сравнению с предыдущим периодом, возможно, связано с сокращение объема производства и использованием более точных методов анализа по сравнению с предыдущим периодом исследований [Финашов, Востротин, Янов].

Представляет интерес сравнить уровни концентраций трития в моче людей для зоны воздействия ПО «Маяк» с литературными данными для других территорий мира (табл. 8). В последнем случае они заметно ниже, что свидетельствует о вкладе ПО «Маяк» в загрязнение тритием исследуемой территории.

Таблица 8

Уровни содержания трития в моче людей в различных странах мира

Страна	Условия проживания	Концентрация НТО, Бк/л	Литературный источник
Китай	Население, проживающее на разном расстоянии от Циньшаньской АЭС: 2 км 10 км 22 км	 3,5 ± 1,6 2,1 ± 0,6 3 ± 0,8	[Bao-Ming Shen]
Финляндия	Население	2,55 (среднее), 18,3 (максимальное)	[Puhakainen, Heikkenen]
Канада	Оттава, 200 км к востоку от исследовательского реактора	6,5	[Kotzer, Trivedi]
	10 км от реактора Дин-Ривер	15,9	
Канада	2 км от Вольсунгской АЭС	16,4 – 31,4	[Tritium analysis…]
Корея		1,8 – 5,6 (среднее 2,8 – 1,4)	[Yoon, Ha, Lee]

Глава 2

БЕЛОЯРСКАЯ АЭС им. КУРЧАТОВА

§ 1. Характеристика района исследований

Белоярская атомная электростанция – 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 1 321 км, в его состав входят 45 населенных пунктов с населением 34,8 тыс. жителей. 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 ~ 450 мм. Зимой преобладают ветра западного и юго-западного, а летом – северо-западного направлений. Окрестности АЭС в пределах 30 км 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 и уровень…].

Белоярская АЭС находится в г. Заречный, в 45 км к востоку от г. Екатеринбурга. Станция пущена в эксплуатацию в 1964 г. За время существования станции 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 перспекти-

ве рассматривается строительство 5-го энергоблока с реактором БН-1200 мощностью 1220 МВт [Белоярская АЭС…].

Для создания научной базы при оценке воздействия работающей АЭС на экосистемы прилегающей к АЭС 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, Николин; Миграция радионуклидов…, Влияние АЭС…; Молчанова, Караваева, Михайловская; Концептуальная модель…]. Это в первую очередь относится к тритию, концентрация которого в водной среде весьма динамична при сбросе в открытые, особенно в проточные, водоемы и быстро меняется во времени и пространстве.

Представленные ниже результаты мониторинга трития получены в 1980–2015 гг. и включают периоды индивидуальной и совместной работы 1–3 энергоблоков. Объектами наблюдений служили Белоярское водохранилище (водоем – 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 проводили на более удаленной территории.

§ 2. Белоярское водохранилище

В процессе строительства БАЭС для охлаждения реакторов и технического водоснабжения станции в русле р. Пышмы в 75 км от истока в 1959–1963 гг. был создан искусственный водоем – Белоярское водохранилище. В зону затопления попала часть территории Белоярского района, в основном покрытая смешанными березово-сосновыми лесами. Кроме того, были затоплены пахотные и луговые угодья Белоярского и Березовского районов. На основной площади водоема также затоплены кустарники, пни, срубленные деревья. Протяженность водоема – около 20 км, ширина на уровне Белоярской атомной электростанции – около 3 км. Глубина по фарватеру р. Пышмы достигает 15–20 м, средняя глубина – 8–9 м. Площадь зеркала водоема составляет примерно 47 км^2 [Бескрестнов, Фатькин, Колтик]. Берега водоема преимущественно пологие, местами

каменистые, в основном заняты лесом, кое-где встречаются кустарниковые болота и пастбищно-луговые угодья. В водоем 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 prefoliatus, P. pectinatus, P. compressus), кладофора (Cladophora glomerata, C. fracta*), элодея канадская (*Elodea canadensis*), роголистник погруженный (*Ceratophyllum demersum*) и некоторые другие виды. Ихтиофауна водоема представлена в основном плотвой, лещем, щукой, зеркальным карпом, реже встречаются линь, карась, окунь, судак. Среди фитопланктонных организмов по числу видов преобладают зеленые водоросли (хлорококковые, десмидиевые, вольвоксовые), менее распространены диатомовые, синезеленые, эвгленовые, пирофитовые и другие отделы водорослей. В составе зоопланктона основную массу составляют ракообразные (веслоногие и ветвистоусые рачки), в меньшей численности встречаются коловратки [Чеботина, Гусева, Трапезников]. Преобладающим типом донных отложений в водоеме является илистый сапропель, кроме него встречаются затопленная почва, песчано-илистый и песчаный грунты. По гидрохимическому составу водоем можно характеризовать как гидрокарбонатно-кальциевый со средней степенью минерализации и нормальным кислородным режимом [Ярушина, Гусева, Чеботина].

Белоярская атомная электростанция расположена на левом берегу водохранилища, в 7 км к северу от плотины. Поступление радиоактивных веществ, в том числе и трития, от АЭС во внешнюю среду возможно воздушным (через вентилляционные трубы, в виде принудительного выхлопа пара из барбатеров) и водным путем. 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 водоем-охладитель осуществляется через промливневый канал (ПЛК). На расстоянии ~ 0,5 км от него, ниже по течению, расположен водозаборный канал, через который производится забор воды из водоема для систем охлаждения АЭС. Еще ниже (~ 2–2,5 км) располагается водосбросной (теплый) канал, с помощью которого вода после прохождения через системы охлаждения сбрасывается в водоем. В зоне подогрева (Теплый залив) температура воды в летний период в среднем на 6–7 °С выше, чем за ее пределами.

В 0,5 км от БАЭС в сторону верховья водохранилища находится обводной канал общей протяженностью около 1,5–2 км. Он берет свое начало около водоочистных сооружений, далее в него сливаются воды из котельной БАЭС. Канал впадает в залив водоема-охладителя за Биофизической станцией.

Для контроля поступления трития от АЭС на акватории Белоярского водохранилища были выбраны постоянные точки наблюдения (ПТН), в которых производили систематический отбор проб воды для определения содержания в ней радионуклида: 1 – верховье водоема; 2 – район плотины; 3 – промливневый канал станции; 4 – Теплый залив; 5 – район Биофизической станции (рис. 33).

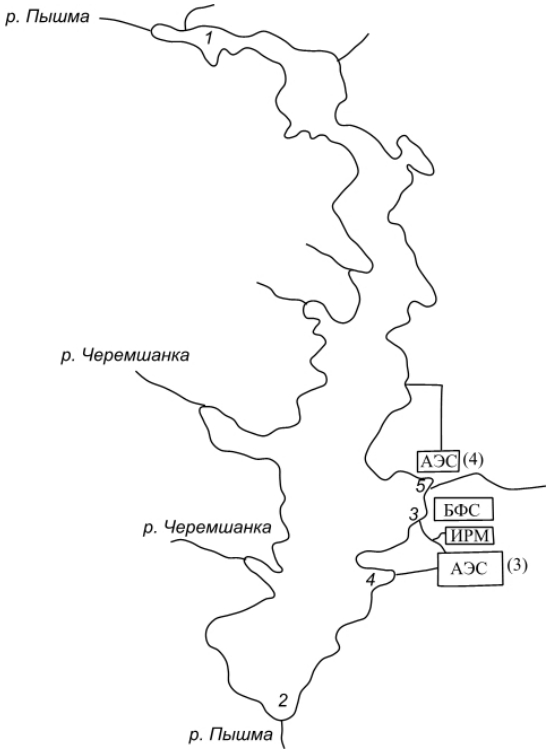

Рис. 33. Схема Белоярского водохранилища и расположение на нем постоянных точек наблюдений: АЭС (3) и АЭС (4) – 3-й и 4-й энергоблоки Белоярской АЭС

Примечание: ИРМ – Институт реакторный материалов; БФС – Биофизическая станция Института экологии растений и животных УрО РАН; 1–5 – постоянные точки наблюдений (ПТН)

Верховье водоема (*ПТН-1*). Верховье водоема находится за пределами наблюдаемой зоны АЭС вверх по течению на расстоянии примерно 15 км от атомной станции. В связи с этим первоначально полагалось, что слаборадиоактивные стоки, содержащие тритий, не могут непосредственно попадать в верхнюю часть водоема, поэтому первоначально эта точка была выбрана в качестве контрольной.

Однако, как видно из приведенных на рис. 34 результатов, 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 заметное превышение было зафиксировано в феврале 1996 г. (~ 70 Бк/л).

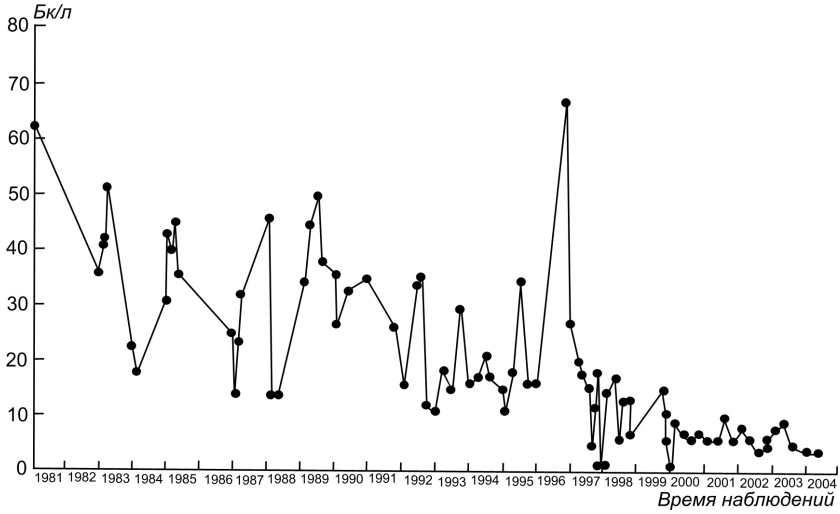

Рис. 34. Динамика концентраций трития в верховье Белоярского водохранилища

Анализ результатов всех наблюдений с 1980 по 2005 г. в совокупности позволил выявить общую тенденцию к снижению содержания радионуклида в воде верховья водоема от 40–60 Бк/л в 1980–1982 гг. до 6–10 Бк/л в 1999–2003 гг. До 1989 г. средняя

концентрация нуклида оказалась примерно в два 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) работали 1-й и 2-й энергоблоки, а в последующий период (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 трития в воде исследуемого региона. К концу указанного периода наблюдений концентрация трития в верховье Белоярского водохранилища практически приближалась к уровню техногенного фона.

Район плотины (*ПТН-2*). На рис. 35 показана динамика концентраций трития в районе плотины, где вода из Белоярского водохранилища вытекает в реку Пышму. В целом, если исключить

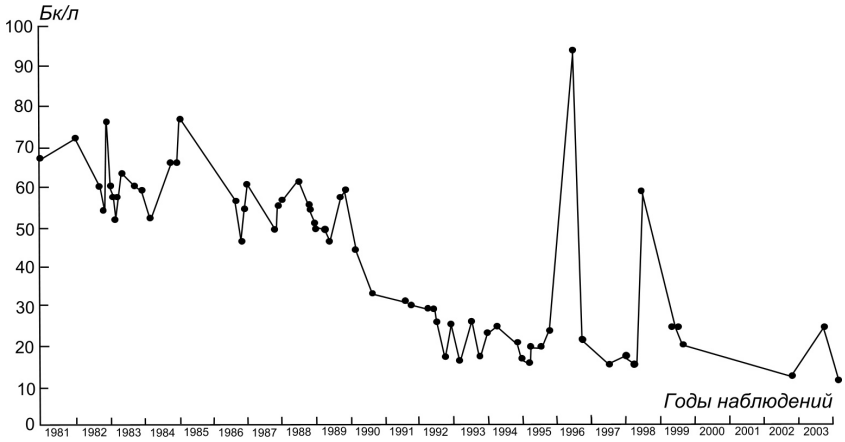

Рис. 35. Динамика концентраций трития в воде Белоярского водохранилища в районе плотины

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 регистрировались 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 г. при совместной работе блоков (58 Бк/л), был достоверно выше, чем в последующие годы, когда работал только 3-й энергоблок (22 Бк/л).

Сравнение данных, характеризующих содержание трития в верховье и районе плотины водоема, позволяет выявить вклад атомной станции в загрязнение водной среды. В период с 1980 по 1989 г. 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. 33). Пробы отбирали из общего канала, соединяющего стоки обоих предприятий, однако в отдельных случаях их анализировали отдельно. Приведенные на рис. 36 данные указывают на резкие колебания концентрации радионуклида в воде этого канала. Высокий показатель зарегистрирован в общем канале в июле 1987 г. (1516 Бк/л). В мае 1995 г. в канале

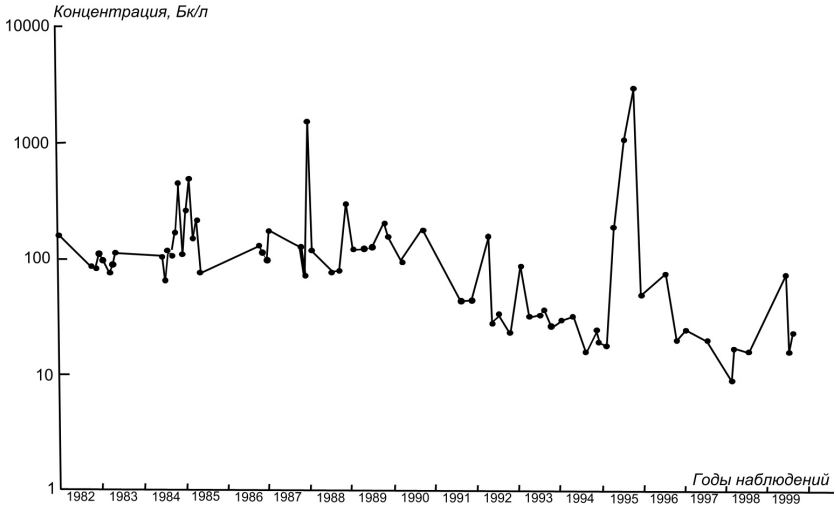

Рис. 36. Динамика концентраций трития в воде промливневого канала

ИРМ была зарегистрирована концентрация трития в воде 3020 Бк/л. Последнее 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.

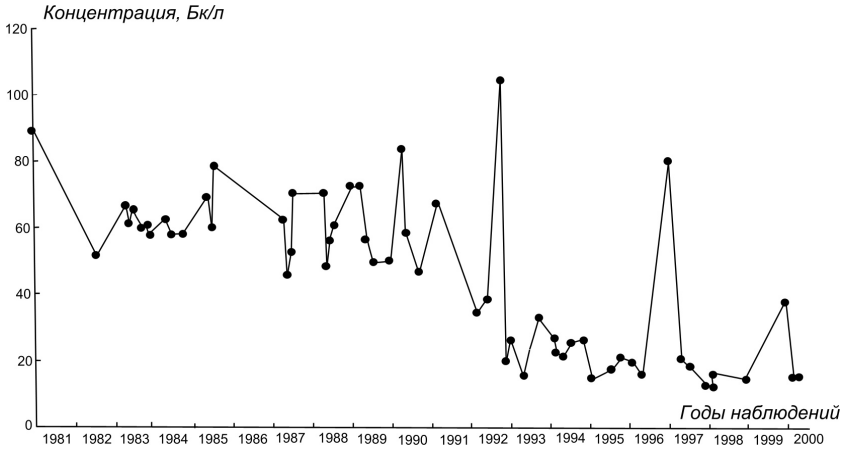

Рис. 37. Динамика концентраций трития в воде в районе сброса подогретой воды

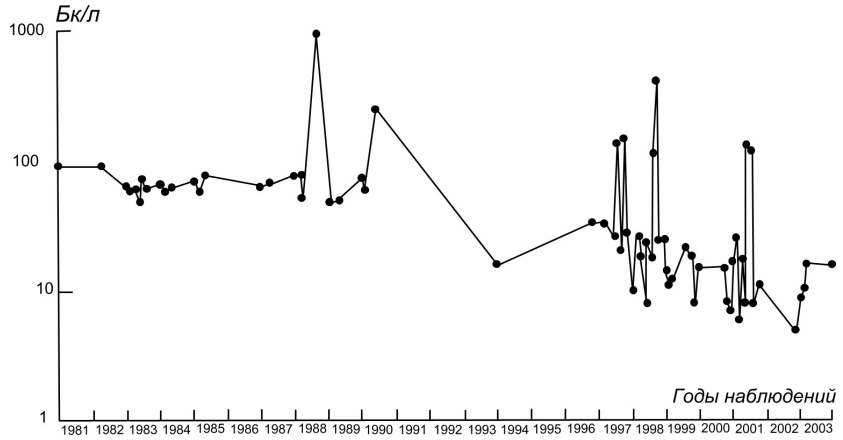

Рис. 38. Динамика концентраций трития в районе Биофизической станции

Теплый канал (*ПТН-4*). Через этот канал в Теплый залив сбрасывается подогретая вода, прошедшая через системы охлаждения АЭС. Залив изолирован от водоема дамбой, так что непосредственно из водоема вода в него не поступает. Концентрация трития в теплом канале в разное время исследований варьировала от 13 до 105 Бк/л (рис. 37). Период совместной работы энергоблоков (1980–1989) характеризовался повышенным содержанием трития в воде (в среднем 65 Бк/л) по сравнению с последующий периодом, когда работал только 3-й энергоблок. В это время концентрация трития в зоне сброса подогретой воды снизилась в среднем в три раза (до 22 Бк/л). В ноябре 1991 г. и феврале 1996 г. зарегистрированы пиковые концентрации радионуклида в воде, что, возможно, обусловлено поступлением радионуклида в системы охлаждения через водозаборный канал с вышерасположенной части водоема.

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, представленные на рис. 38, указывают на резкие перепады концентраций трития в воде залива. Так, в январе 1988 г., октябре 1989 г., декабре и феврале 1998 г., 1999 г. зарегистрированы 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 г. проводили мониторинг радионуклида в воде канала на разном расстоянии от залива. Отбор проб производили 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 Бк/л), полученные результаты позволили выделить несколько периодов, раз-

личающихся по уровням содержания радионуклида в воде канала. Период с 1988 по сентябрь 1989 г. характеризовался наиболее высокими показателями трития, в это время работали 2-й и 3-й энергоблоки АЭС. В дальнейшем (сентябрь 1989 по 1995 г.) 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. 10). Кроме снятия с эксплуатации 2-го энергоблока, снижению поступления трития в водоем через обводной канал в этот период способствовали технологические мероприятия, проводимыми АЭС с целью снижения поступления трития в окружающую среду.

Таблица 10

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

Место отбора проб	1988 – сент. 1989 гг.	Сент. 1989–1995 гг.	1996–1998 гг.	2000–2001 гг.
Ниже водоочистных сооружений	4150	1672	409	24
Выше водоочистных сооружений	5420	1493	Не опр.	22
Район котельной	2420	1398	197	218
Около пересечения дорог	1620	2972	Не опр.	282
Устье канала	1220	2615	218	162
Среднее	2970	2030	275	142

В целом результаты мониторинга трития на акватории Белоярского водохранилища с 1980 по 2003 г. показали, что в воде наблюдаемой зоны водоема-охладителя, где размещались постоянные точки наблюдений ПТН-2, ПТН-3 и ПТН-4, содержание радионуклида в воде было достоверно выше, чем в верховье водоема (ПТН-1), расположенном примерно в 15 км вверх по течению ($p < 0{,}001$), что свидетельствует о дополнительном поступлением трития в водоем в результате 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).

§ 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 р. Пышму. 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 отчужденной территорией, входящей в санитарно-защитную зону БАЭС. Она включает в себя сбросной канал, впадающий в Ольховское болото, само болото и небольшую речку Ольховку, вытекающую в р. Пышму. Через сбросной канал длиной ~ 200 м в болото производится контролируемый сброс технологических вод АЭС после прохождения через водоочистные сооружения (рис. 39). Грунт болота – преимущественно осоковый торф, максимальная глубина торфяной залежи ~ 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 береза, ива серая, много сухостоя. Среди мохового покрова – сфагнум щетинистый, в микропонижениях – аулакониум болотный и другие виды мха. К окраинам болота приурочен березняк осоковый с высотой древостоя 10–12 м. Площадь болота составляет ~ 47 га. Технологические стоки сформировали в болоте несколько русел, которые прослеживались в верхней и средней частях болота, а затем пропадали в болотной растительности в нижней его части.

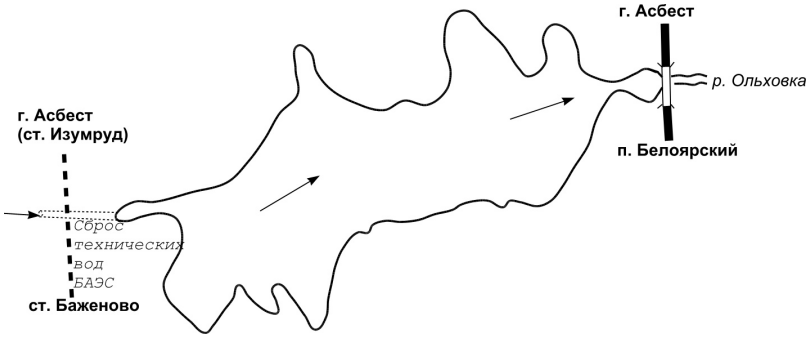

Рис. 39. Схематический план Ольховского болота

Первый этап исследований различных звеньев болотно-речной экосистемы характеризовался сравнительно высокими концентрациями трития по всей ее протяженности. Так, в 1981–1982 гг. регистрировались следующие уровни содержания радионуклида в воде, Бк/л: сбросной канал 44–29710, начало болота 370–19830, 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 связано с периодичностью сбросов АЭС. В указанный период времени между верхним и нижним участками болота концентрация трития снижалась примерно в два раза (рис. 40). 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…]. Это предположение подтверждено геофизическими исследованиями, которые показали, что болото располагается в тектонически нарушенной зоне, где имеется подпор глубинных вод из тектонического разлома [Особенности радиационной обстановки…]. Разбавление сбросной воды происходит в основном на участке, расположенном в верхней части болота.

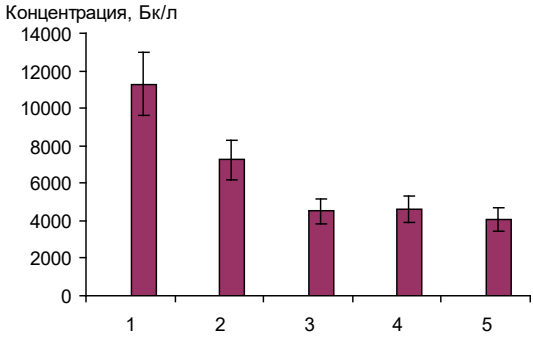

Рис. 40. Концентрация трития в воде Ольховской болотно-речной экосистемы в 1981–1982 гг.: 1 – сбросной канал; 2 – начало болота; 3 – средняя часть болота; 4 – исток р. Ольховки; 5 – устье р. Ольховки

В табл. 11 приведены усредненные по годам результаты мониторинга трития в воде Ольховского болота в период с 1981 по 1990 г.

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 три раза выше (3265 ± 794 Бк/л при $n = 62$), чем после остановки 2-го блока, когда функционировал только 3-й энергоблок (1030 ± 156 Бк/л при $n = 46$). Установленное различие достоверно при $p < 0{,}001$. Согласно расчетным данным, среднегодовое поступление радионуклида в Ольховское болото от АЭС в период с 1981 по 1989 г. составило $(300–400)\cdot 10^{10}$ Бк/год, а в 1990 г. – $(110–130)\cdot 10^{10}$ Бк/год [Чеботина, Кулигин, Реч].

Таблица 11

Усредненные концентрации трития в воде Ольховского болота в различные годы наблюдений

Годы наблюдений	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

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. 41 приведены усредненные 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 кон-

центрации радионуклида в сбросной воде в указанный период времени (табл. 11). Приведенные данные свидетельствуют о том, что при длительном транзите загрязненной тритием воды через торфяную залежь Ольховского болота часть радионуклида поглощается в профиле грунта и удерживается в нем. Тритий, связанный с грунтом, находится в состоянии динамического равновесия с водой, протекающей через болото.

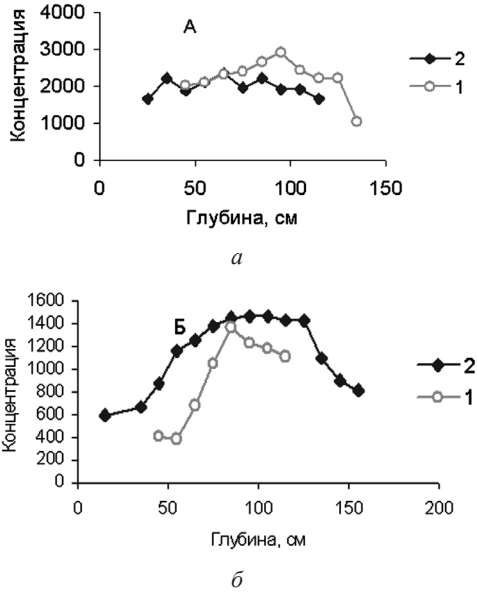

Рис. 41. Распределение трития по глубине торфяной залежи Ольховского болота, Бк/л.: *а* – 1983 г.; *б* – 1984 г.; 1 – профиль на транзитном потоке; 2 – профиль на расстоянии 10 м от транзитного потока

С 1980 по 2000 г. проводился систематический мониторинг трития в воде истока р. Ольховки, вытекающей из Ольховского болота. Как видно на рис. 42, за период наблюдений концентрация радионуклида изменялась в широких пределах – от 10 до 10000 Бк/л. Несмотря на вариабельность данных, прослеживалось снижение концентрации трития в воде во времени. После вывода из эксплуатации 2-го энергоблока в 1989 г. 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 $n = 33$). Статистиче-

ская обработка результатов показала, что указанные различия высоко достоверны при уровне значимости $p < 0{,}01$.

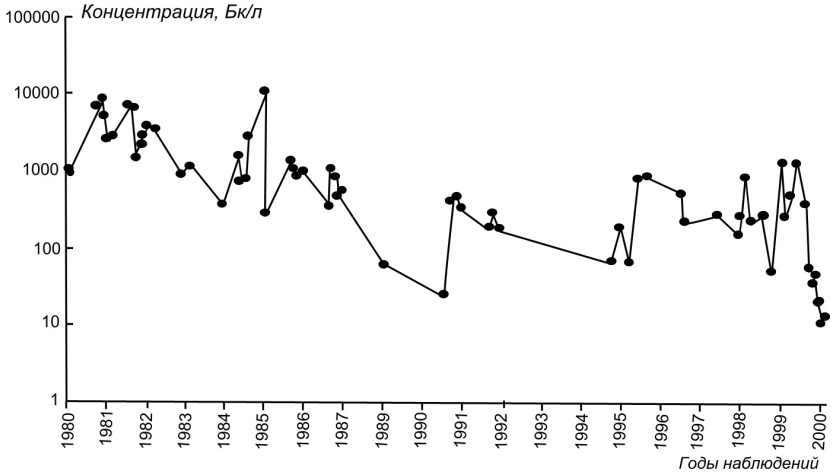

Рис. 42. Динамика концентраций трития в р. Ольховки на выходе из Ольховского болота

Следует отметить, что при исследовании роли Ольховского болота как природного фильтра на пути слаборадиоактивных стоков БАЭС в отделе континентальной радиоэкологии 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 емкость болота значительно снизилась, а грунт болота в некоторых местах по суммарному количеству радионуклидов классифицировался как радиоактивные отходы [Распределение ^{90}Sr и ^{137}Cs; Нифонтова, Маковский, Куликов; Молчанова, Караваева, Куликов; Маковский, Нифонтова, Новгородцева]. Для предотвращения вымывания радионуклидов в речную сеть атомной станцией были проведены работы по реконструкции сбросов. В результате этого мероприятия дебалансные воды через специальный трубопровод были выведены в нижнюю часть болота. После реконструкции сбросов содержание воды в болоте сократилось, обозначилось русло, впадающее в р. Ольховку.

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 на рис. 43, 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 еще в ощутимых концентрациях обнаруживался в воде – до 800–1300 Бк/л.

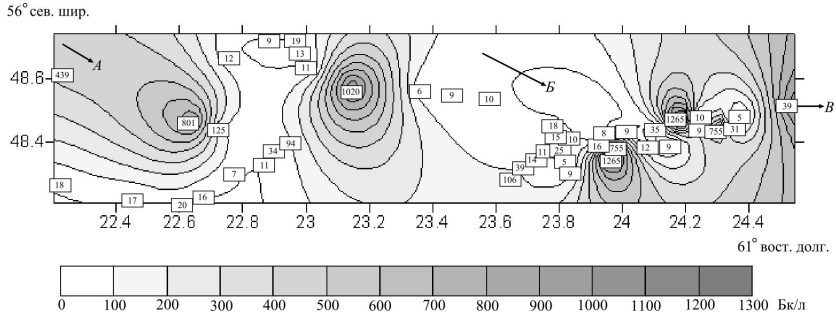

Рис. 43. Уровни концентраций трития в воде Ольховского болота в 2003 г., Бк/л: *А* – сброс хозфекальных стоков; *Б* – сброс дебалансных вод; *В* – сброс воды в р. Ольховку

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

§ 4. Водная система р. Пышмы

Река Пышма является важной водной артерией на территории Свердловской и Тюменской областей. Исток реки – озеро Ключевское, расположенное на массиве Молебского болота, вблизи

г. Верхняя Пышма. Протяженность реки – 626 км, площадь водосбора – 19,4 тыс. км^2. Река пересекает с запада на восток обширную зауральскую лесостепь и впадает в р. Туру. Берега р. Пышмы в верхнем ее течении покрыты лесом, в среднем – преимущественно скалистые, а в нижнем течении 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, Сажина, Шилкова].

Вода р. Пышмы. Река Пышма принимает в себя стоки АЭС, выходящие из Белоярского водохранилища, а далее вниз по течению – слаборадиоактивные стоки, вытекающие из Ольховского болота через р. Ольховку. В 1981–1984 гг. исследовали уровни концентраций трития в р. Пышме выше (~ 500 м) и ниже (~ 500 м) места впадения р. Ольховки (табл. 12). Видно, что стоки р. Ольховки увеличивали поступление трития в расположенную ниже по течению часть р. Пышмы. При этом наиболее загрязненной оказалась вода реки в период работы 1-го и 2-го энергоблоков. После остановки 1-го блока (1981 г.) уровень содержания трития в указанных точках наблюдения на р. Пышме стал снижаться.

Таблица 12

Усредненные концентрации трития в воде р. Пышмы выше и ниже места впадения р. Ольховки, Бк/л

Период наблюдений	Р. Пышма выше места впадения р. Ольховки	Р. Пышма ниже места впадения р. Ольховки
1981 г.	33 ± 18 (n = 5)	621 ± 320 (n = 5)
1982 г.	46 ± 4 (n = 3)	148 ± 18 (n = 3)
1983 г.	44 ± 3 (n = 4)	90 ± 8 (n = 4)
1984 г.	45 ± 3 (n = 3)	55 ± 2 (n = 3)

С 1983 по 2001 г. исследовали содержание трития в воде р. Пышмы на расстоянии до 120 км от места впадения р. Ольховки (табл. 13). Мониторинг радионуклида 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 р. Пышмы за счет разбавления водами этой реки. 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 р. Пышмы 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, Реч, Куликов; Чеботина, Николин, 2005].

Следует заметить, что в отдельные периоды наблюдений регистрировались повышенные сбросы трития в р. Пышму. Так, 15–20 июня 2002 г. определялись следующие концентрации радионуклида в воде реки: п. Белокаменный – 22 Бк/л, Пылаево – 430 Бк/л, Успенка – 13 Бк/л, Винзили – 1500 Бк/л, Муллаши – 62 Бк/л. Повышенная концентрация трития в районе п. 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 р. Пышме носит эпизодический характер, однако она свидетельствует о том, что сбросы в реку должны находиться под постоянным наблюдением.

В 2013 г. были исследованы уровни концентраций трития в воде р. Пышмы в районах населенных пунктов, расположенных на протяжении реки от плотины Белоярского водохранилища до п. Винзили. Кроме того, исследовали проникновение тритиевого загрязнения в различные типы питьевых вод в населенных пунктах, расположенных в пойме реки (колодцы, скважины, родники, сетевая вода колонок). Отбор проб воды производили 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 на рис. 44, 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 трех до пяти раз превышали уровень техногенного фона по тритию для Уральского региона [Чеботина, Николин, 2005]. Содержание трития в воде р. Пышмы достоверно снижалось по мере удаления от плотины (КК = – 0,71; p = 0,033).

Таблица 13

Концентрации трития в воде р. Пышмы на разном расстоянии от устья р. Ольховки, Бк/л

Пункт наблюдений	Расстояние от устья р. Ольховки, км	08.1983	10.1983	08.1984	07.1990–08.1990	05.1991	06.1991	07.1991	07.1999	07.2000	08.2001–12. 2001
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	–	–	–	37	–	–	–	–	–	–	–
		56 ± 4	89 ± 8	59 ± 9	42 ± 1	24 ± 2	29 ± 6	28 ± 1	14 ± 1	16 ± 10	13 ± 2

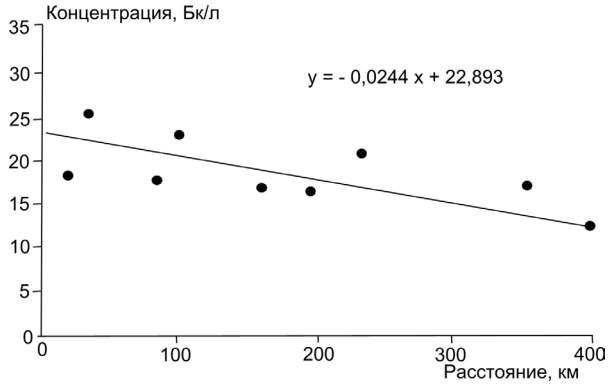

Рис. 44. Концентрация трития в воде р. Пышмы на разном расстоянии от плотины водоема-охладителя

Колодцы. Согласно проведенным исследованиям, содержание радионуклида в воде колодцев, расположенных в пойменной зоне р. Пышмы, в период исследований варьировало от 8 до 19 Бк/л при среднем значении 13 ± 1 Бк/л. Концентрация радионуклида достоверно снижалась с увеличением расстояния населенных пунктов до плотины Белоярского водохранилища (КК = –0,80; p = 0,033) (рис. 45). Глубина колодцев варьировала от 2 до 8 м. Анализ данных показал, что концентрация трития достоверно снижалась с увеличением их глубины (КК = 0,67; p = 0,065) (рис. 46). На всем протяжении реки это снижение было в пределах двух раз.

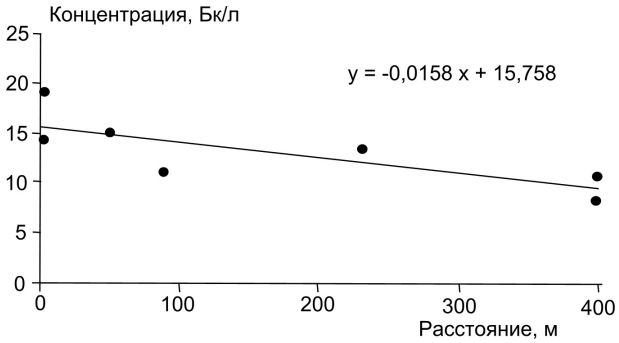

Рис. 45. Средние концентрации трития в воде колодцев населенных пунктов в прибрежной зоне р. Пышмы на разном расстоянии от плотины Белоярского водохранилища

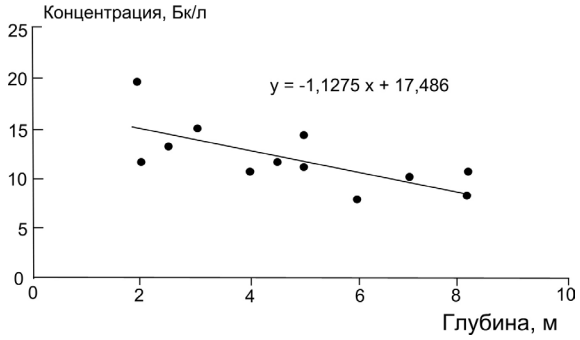

Рис. 46. Зависимость концентраций трития в воде колодцев в населенных пунктах по р. Пышме от глубины источника

Личные скважины. Исследованные личные скважины в пойме р. Пышмы имели глубину от 5 до 47 м. Как видно на рис. 47, содержание радионуклида в скважинной воде изменялось от 7 ло 16 Бк/л при среднем значении 12 ± 1 Бк/л. В целом на всем протяжении реки содержание трития в воде скважин не зависило 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 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 водоема-охладителя в водоносные горизонты.

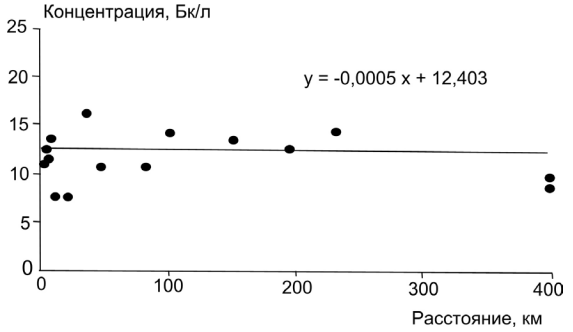

Рис. 47. Уровни концентраций трития в воде личных скважин в населенных пунктах поймы р. Пышмы на разном расстоянии от плотины Белоярского водохранилища

Анализ концентраций трития в воде личных скважин в зависимости от их глубины (рис. 48) также не выявил существенных различий между ними, что подтверждено результатами статистической обработки ($p > 0,05$).

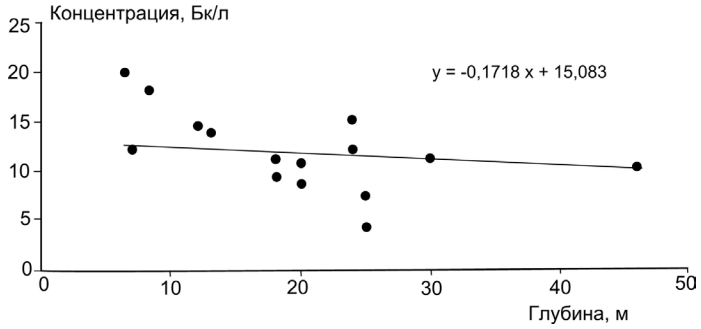

Рис. 48. Уровни концентраций трития в воде личных скважин в населенных пунктах поймы р. Пышмы в зависимости от глубины источника

Сетевая вода. В табл. 14 представлены уровни концентраций радионуклида в сетевой воде, поступающей в водопроводные колонки некоторых населенных пунктов, расположенных в прибрежной зоне р. Пышмы. В колонки подается вода из специально пробуренных глубинных скважин. К сожалению, глубину таких скважин удалось установить только для двух населенных пунктов. Оказалось, что для большинства населенных пунктов уровни концентрации трития в сетевой воде имеют близкие значения (12–18 Бк/л) и практически не зависят от расстояния населенного пункта до водоема-охладителя. Только для двух пунктов наблюдений (Знаменский и Сухой Лог) отмечены пониженные значения концентраций 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 14

Содержание трития в сетевой воде населенных пунктов, расположенных в пойме р. Пышмы

Населенный 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

Таблица 15

Средние концентрации трития в родниковой воде населенных пунктов, расположенных в пойме р. Пышмы

Населенный пункт	Концентрация, Бк/л
Курманка	23
Гагарка	20
Крутиха	22; 17
Ялунино	26
Белокаменный	24
Сухой Лог	34
Новопышминский	14
Среднее	22 ± 3

Родниковая вода. Уровни концентраций трития в родниковой воде семи населенных пунктов, расположенных в пойме р. Пышмы на разном расстоянии от Белоярской АЭС, имеют близкие зна-

чения и не зависят от расстояния (табл. 15). В среднем они почти в два раза выше, чем соответствующие концентрации радионуклида в сетевой воде.

Таким образом, результаты исследований водной системы р. Пышмы в 2013 г. позволили выявить повышенные уровни концентраций радионуклида на всем протяжении реки, от трех до пяти 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 р. Пышмы с увеличением расстояния до плотины Белоярского водохранилища свидетельствует о том, что тритиевое загрязнение поступает в них преимущественно из р. Пышмы. 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 р. Пышмы. 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, связано с загрязнением ее за счет поступления трития от воздушных выбросов и поверхностных вод, имеющих более высокую концентрацию радионуклида.

§ 5. Воздушная среда

Для оценки возможности поступления трития от АЭС с воздушными выбросами на крыше Биофизической станции (рис. 33) 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 1 суток проводили в разное время года при сухой безветренной погоде в течение ряда лет. Сосуды помещали на экспозицию во времени случайным образом. После экспозиции определяли уровни концентраций радионуклида в воде экспериментальных сосудов описанным выше способом.

Содержание трития в дистиллированной воде, использованной в опыте в качестве поглощающей радионуклид среды, в раз-

ное время проведения эксперимента варьировало от 5 до 28 Бк/л при среднем значении 9,7 ± 1,2 Бк/л.

На рис. 49 показано, как изменяется концентрация трития в экспериментальных сосудах, помещенных на крыше Биофизической станции в разные годы наблюдений. Оказалось, что более 80 % временных точек по содержанию трития превышало уровень, установленный для дистиллированной воды до начала экспозиции. В ряде случаев такое превышение достигало 10–40 раз. Аналогичная картина выявлена при экспозиции дистиллированной воды в помещении Биофизической станции, куда радионуклид может поступать из окружающего воздушного пространства через окна и двери (рис. 50).

Рис. 49. Изменение концентраций трития в экспериментальных сосудах, размещенных на крыше Биофизической станции

Рис. 50. Динамика изменения концентраций трития в воде экспериментальных сосудов, размещенных в здании Биофизической станции

Анализ приведенных на рисунках 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 помещения Биофизической станции дольше очищается от поступившего радионуклида, чем открытое воздушное пространство на крыше здания. 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 ввиду большой подвижности трития в воздушной среде он может проникать внутрь зданий, создавая в них повышенный тритиевый фон.

§ 6. Дождевые и снеговые осадки

Дождевые и снеговые осадки, проходя через воздушное пространство, поглощают содержащийся в нем радионуклид, очищая тем самым 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 результатам, полученным в 1983–1984 гг., не выявлено существенных различий по концентрациям трития в дождевых осадках различных пунктов наблюдений. 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. 16). Средние концентрации радионуклида в дождевых осадках наблюдаемой зоны АЭС не отличались от результатов, полученных для контрольных районов.

Таблица 16

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

Место отбора проб	06.1983	07.1983	08.1983	Среднее за 1983 г.	06.1984	07.1984	08.1984	Среднее за 1984 г.
Каменка	20	20	14	18 ± 3	–	23	17	19 ± 0,2
Режик	27	20	15	21 ± 5	–	30; 27	23	24 ± 2
Муранитный	17	20	16	18 ± 2	27	27	22	21 ± 2
Мезенка	–	–	–	–	–	28; 27	27	27 ± 0,4
Заречный	20	25	16	20 ± 4	32	–	–	23 ± 4
Биостанция	30	25	20	25 ± 4	20	32; 28	23; 23	25 ± 1
Промплощадка БАЭС	–	–	–	–	–	30; 31	23; 22	26 ± 2
П. Рефтинский	23	22	16	20 ± 3	26	28	22	23 ± 2
Ботанический сад	18	22	18	19 ± 2		24	20	20 ± 1

В 1997 г. после вывода из эксплуатации 2-го энергоблока содержание трития в дождевых осадках в районе Биофизической станции составляло: в мае – 18, июне – 22, июле – 41, августе – 14, сентябре – 9,5 Бк/л. 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 п. Рефтинский, Верхнее Дуброво и Ботанический сад УрО РАН в г. Екатеринбурге. Как видно из данных табл. 17, повышенная концентрация радионуклида в снеговой воде зарегистрирована 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 17

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

Место наблюдений	03.1981	03.1982	03.1985
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
п. Рефтинский	33 ± 2	28	15
г. Екатеринбург, Ботанический сад	–	12	27
п. Верхнее Дуброво	33 ± 2	16 ± 1	–

В 1986 г. прилегающий к БАЭС район был обследован более детально. Для этой цели отбирали пробы снега на расстоянии ~1 км в разных направлениях от АЭС, а также в районе Биофизической станции. Приведенные в табл. 18 данные подтвердили факт повышенных концентраций радионуклида в снеговой воде вокруг атомной станции. При этом наиболее высокие концентрации радионуклида оказались в районе Биофизической станции.

Таблица 18

Концентрации трития в снеговой воде в период 01–03.1986 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 наблюдались эпизодические повышенные концентрации радионуклида преимущественно в местах, примыкающих к АЭС и ИРМ (табл. 19). 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 снеженного покрова тритием прилегающей к АЭС территории за счет работы экспериментального реактора ИРМ. Последнее подтверждается ранее полученными данными о поступлении радионуклида в водоем-охладитель через промливневый канал ИРМ: в 1995 г. в воде этого канала была зарегистрирована концентрация трития 3020 Бк/л.

Таблица 19

Концентрации трития в снеговой воде в период 1997–2003 гг.

Место отбора проб снега	03.1997	03.1998	03. 1999	03.2000	03.2002	03.2003
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	–	–
п. Муранитный	–	25 ± 1	7 ± 1	14 ±1	–	–
г. Заречный (центр)	32 ± 15	2 ± 1	19 ± 1	17 ± 1	–	–
г. Заречный (теплицы)	27 ± 1	9 ± 3	–	–	–	–
г. Заречный (блинная)	–	4 ± 1	13 ± 2	–	–	–
г. Заречный (лодочная станция)	–	–	8 ± 3	–	–	–
Профилакторий	34 ± 1	–	–	–	–	–
Территория будущего 4-го блока АЭС	37 ± 1	–	18 ± 1	–	–	–
п. Режик	36 ±1	16 ± 2	16 ± 1	14 ± 1	14 ± 1	–
п. 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

Примечание: * данные не включены в расчет средних значений по исследованной территории.

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

В 2010 г. в зону наблюдения были включены населенные пункты, расположенные на расстоянии более 20 км от АЭС. На рис. 51 видно, что концентрация трития в снеговых выпадениях исследуемого региона варьировала от 6 до 32 Бк/л. Относительно низкие концентрации радионуклида (6–8 Бк/л) зарегистрированы 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).

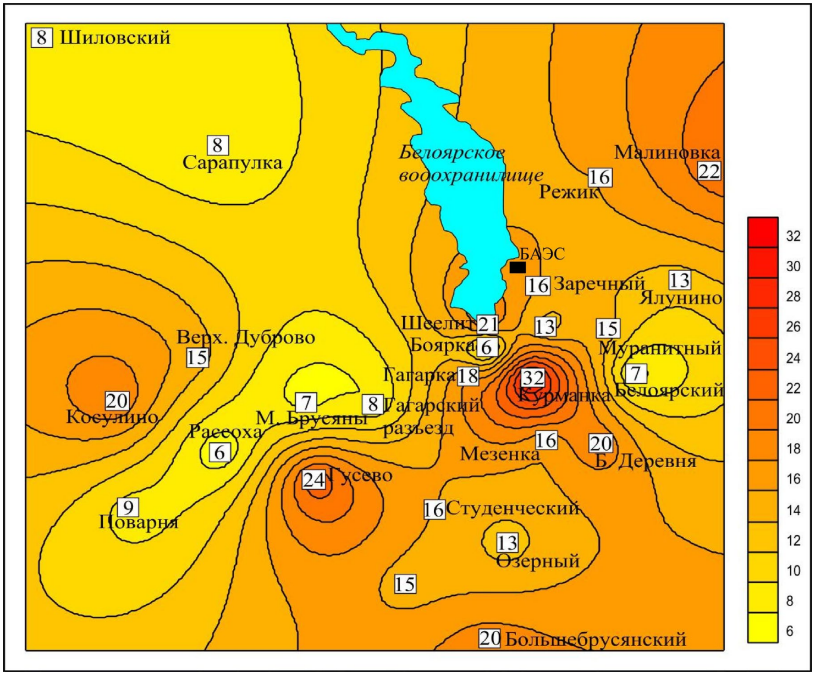

Рис. 51. Уровни концентраций трития в снеговой воде в 2010 г., Бк/л

Приведенные 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.

§ 7. Источники питьевого водоснабжения

Немногочисленные работы по исследованию концентраций трития в подземных, в том числе питьевых водах районов размещения предприятий атомной промышленности указывают на возможность их надфонового загрязнения радионуклидом [Радиационная обстановка…, 2001; Чеботина, Николин, Смагин, 2008; Чеботина; Момот, Сынзыныс; Янов, Востротин, Финашов; Momot, Synzynys, Kozmin]. Уровни концентраций 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; Чуйков, Досмухамедова; Латынова; Геохимическая специализация…].

Изучение уровней загрязнения подземных вод тритием в районе Белоярской АЭС проводили в разные периоды функционирования станции. На первом этапе были получены оценочные данные концентраций трития в питьевых водах некоторых колодцев и скважин в шести различных населенных пунктах наблюдаемой зоны БАЭС в период совместной работы энергоблоков (1981–1989) (табл. 20). Согласно проведенным 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.

Таблица 20

Концентрации трития в воде колодцев и скважин в период 1981–1989 гг., Бк/л

Пункт наблюдения	Водный источник	Глубина, м	Год					
			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

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 27 617 человек (на 2017 г.) расположен в 5-километровой зоне БАЭС на берегу Белоярского водохранилища. В систему водоснабжения г. Заречного вода подается из Каменской скважины глубиной

21 м, расположенной в северо-восточном направлении от БАЭС недалеко от верховья водоема-охладителя. Мониторинг трития в воде скважины проводили с 1989 по 1999 г., в период работы 3-го энергоблока. За этот период концентрации радионуклида в скважинной воде варьировали от уровня техногенного фона до 24 Бк/л при среднем значении 12 Бк/л (рис. 52). Практически все показатели (за исключением одного) превышали уровень техногенного фона для Уральского региона. Полученные результаты мониторинга позволили предположить, что тритиевая метка отчасти попадает в Каменскую скважин 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.

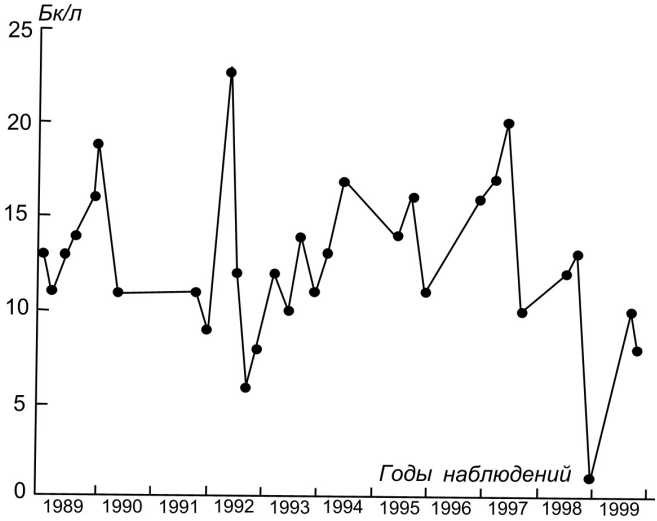

Рис. 52. Динамика концентраций трития в воде Каменской скважины

В 1991–1995 гг. был проведен мониторинг трития непосредственно в горячей сетевой воде г. Заречного (рис. 53). 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 может быть связано

с подпиткой сети горячего водоснабжения от деаэраторов горячего водоснабжения в период наблюдений.

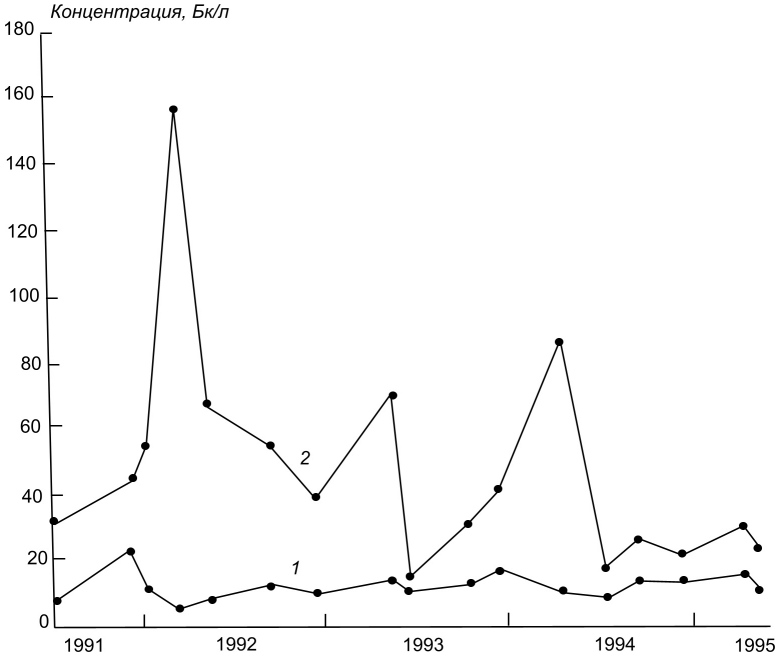

Рис. 53. Сравнительные уровни концентраций трития в горячей воде центрального водоснабжения г. Заречного (2) и Каменской скважины (1) в 1991–1995 гг.

В 2005–2006 гг. исследовали распространение тритиевого загрязнения в питьевую воду других населенных пунктах, расположенных в зоне воздействия АЭС. Для этого были отобраны пробы воды из различных водных источников в населенных 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 воду) в тех пунктах, где оно имеется (10 проб), и воду некоторых родников. Как указывалось ранее, выбор личных скважин и колодцев для отбора проб воды осуществляли случайным образом, а глубину водных источников устанавливали методом опроса их владельцев. На рис. 54 и 55 представлены карты-схемы концентраций радионуклида

в колодцах и скважинах исследуемого региона. Содержание трития в колодезной воде в указанный период времени варьировало от 1 до 25 Бк/л при среднем значении 8,7 Бк/л, а в скважинной воде – 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 водоема-охладителя и далее в р. Пышму мигрируют слаборадиоактивные стоки БАЭС.

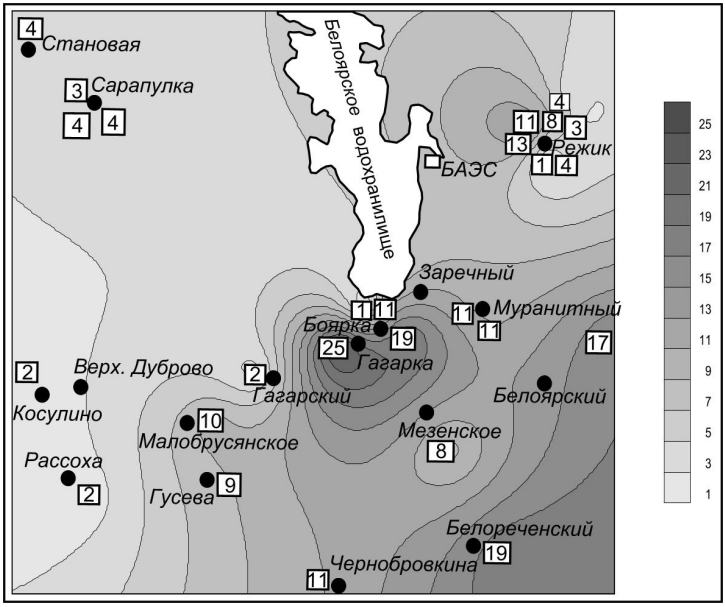

Рис. 54. Карта-схема распространения трития в воде колодцев района БАЭС в 2005–2006 гг., Бк/л

Концентрации радионуклида в родниковой воде в указанный период времени варьировали от уровня техногенного фона до 22 Бк/л, а в сетевой воде – до 12 Бк/л (табл. 21). 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).

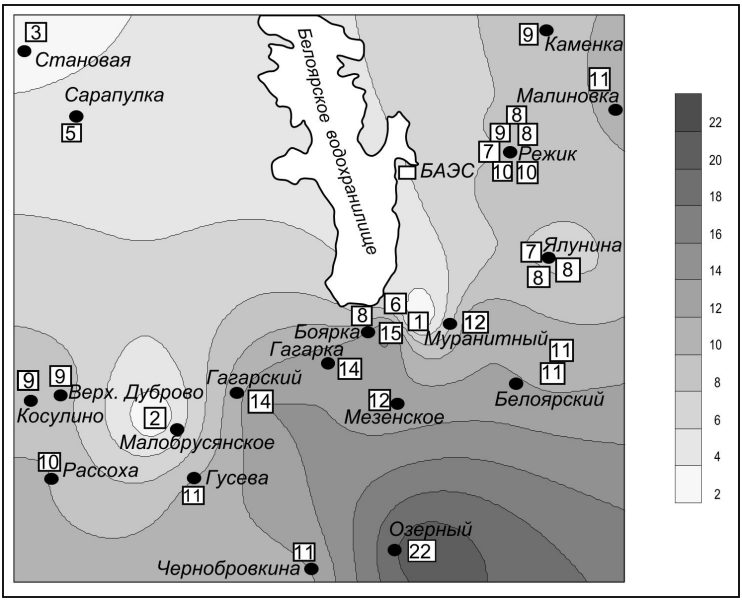

Рис. 55. Карта-схема распространения трития в воде личных скважин района БАЭС в 2005–2006 гг, Бк/л

Таблица 21

Концентрации трития в воде родников и сетевой воде населенных пунктов в 2005–2006 гг., Бк/л

Населенный пункт	Родники	Сетевая вода
Чернобровка	22	–
Косулино	17	–
Рассоха	5	–
Белореченский	–	2
Гусево	18	–
Малобруснятское	15	
Белоярка	–	12
Баженово	–	2

Окончание табл. 21

Населенный пункт	Родники	Сетевая вода
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. ~77 % всех водных проб, включая колодцы, скважины, родники и сетевую воду исследуемого региона, по концентрациям трития в основном превышали уровень техногенного фона. 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 населенном 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. 56 представлены усредненные данные по каждому пункту наблюдений. В целом полученные в 2014 г. результаты подтвердили данные 2005–2006 гг. о наличии зоны надфонового тритиевого загрязнения, примыкающей к южной оконечности Белоярского водохранилища и р. Пышме.

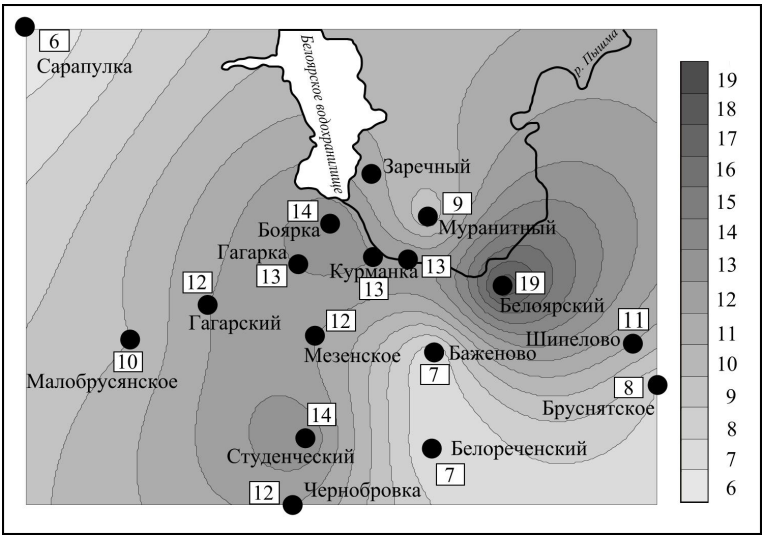

Рис. 56. Карта-схема распространения тритиевого загрязнения скважинной воды в районе БАЭС в 2014 г., Бк/л

Результаты исследований концентраций трития во внутригрунтовой воде за описанные выше два периода наблюдений были подвергнуты дополнительному анализу для выявления зависимости 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 варьировала от 1 до 9 м, содержание трития варьировало от уровня техногенного фона до 20 Бк/л и не зависило от глубины источника (рис. 57). 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. 58). 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 это предположение нуждается в более детальном исследовании.

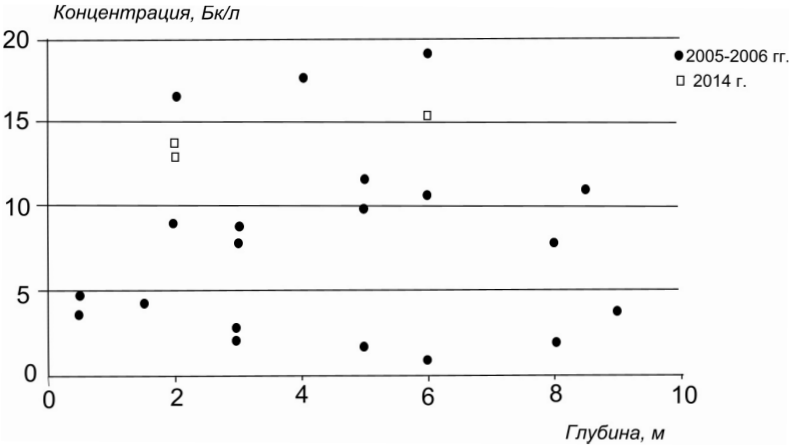

Рис. 57. Уровни концентраций трития в воде колодцев зоны влияния БАЭС в зависимости от глубины источника

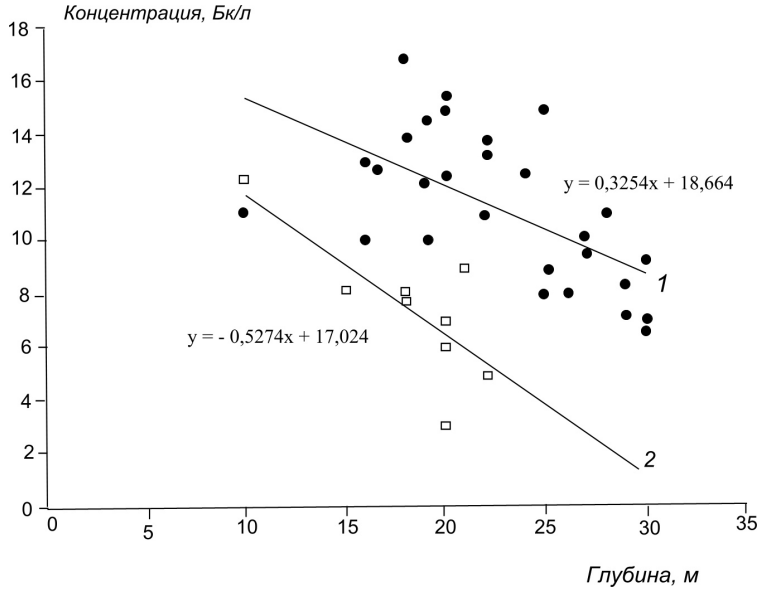

Рис. 58. Зависимость концентраций трития в воде личных скважин жителей района БАЭС от глубины источника:
1 – 2014 г.; 2 – 2005–2006 г.

§ 8. Моча людей

Исследование содержания трития в моче жителей г. Заречного проводилось с января по октябрь 2015 г. среди подростков 15–18 лет, а также среди взрослого трудоспособного населения в возрастных интервалах 20–25, 27–39 и 45–57 лет [Тритий в моче людей…]. Образцы мочи были получены в медсанчасти клинической лаборатории медсанчасти городского поселения. Количество испытуемых составляло 50 человек. Режим отбора проб был произвольный, но не реже двух раз в месяц. В период всего исследования в качестве испытуемых были одни и те же люди за незначительными единичными исключениями, что практически не повлияло на общее количество испытуемых.

Как видно из данных табл. 22, средняя концентрация трития в пробах мочи составляла от 12 до 65 Бк/л при общем среднем значении 39 Бк/л. Уровни содержания радионуклида в моче мужчин и женщин статистически не различались. Однако замечено повышение этого показателя с увеличением возраста: в группе испытуемых в возрастной группе 15–25 лет среднее содержание трития в моче составляет ~21 Бк/л, а в более старшей группе составляет ~ 57 Бк/л.

Таблица 22

Средние концентрации трития в пробах мочи жителей г. Заречного

Возраст, лет	15–18		20–25		27–39		45–57	
Пол	М	Ж	М	Ж	М	Ж	М	Ж
Тритий, Бк/л	31 ± 17	23 ± 19	19 ± 9	12 ± 3	65 ± 21	50 ± 12	60 ± 15	55 ± 17

На рис. 59 представлены результаты изучения концентраций трития в моче испытуемого и содержания радионуклида в использованной им питьевой воде г. Заречного в тот же период времени. Концентрация трития в моче варьировала от 10 до 65 Бк/л при среднем значении 29 ± 7 Бк/л, а в питьевой воде – от 20 до 94 Бк/л при среднем показателе 44 ± 10 Бк/л. Среднее соотношение концентраций трития в моче и питьевой воде в среднем составляло ~0,7. Обработка полученных данных с помощью компьютерной программы Statistica позволила установить наличие достоверной положительной корреляционной связи между содержанием трития в питьевой воде и моче испытуемого (коэффициент корреляции –

0,855; уровень значимости – 0,007). Полученные данные согласуются с данными других авторов по этой теме [Дозиметрический…; Shell, Gauzan, Payne; Baumgartner; Baumgartner, Kardinal, Mullen].

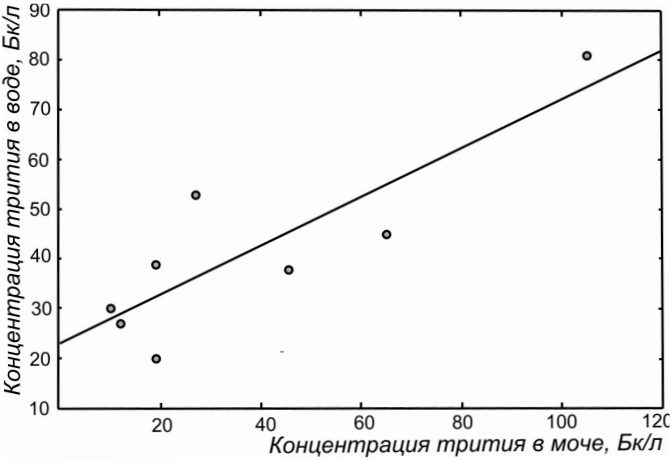

Рис. 59. Корреляционная связь между концентрацией трития в моче и питьевой воде

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тритий – радиоактивный изотоп водорода, относится к числу наиболее распространенных в природе радиоактивных водных мигрантов. Будучи β-излучателем, он включается во все структуры организма и является важным дозообразующим радионуклидом.

Уровень техногенного фона трития в воде, который установился на Земле после прекращения испытаний ядерного оружия в атмосфере, варьирует от 2 до 7 Бк/л. Согласно нашим исследованиям, на севере Свердловской области для разных водных сред он составляет ~5 Бк/л, поэтому эта величина принята нами в качестве техногенного фона по тритию для Уральского региона.

Поскольку радиационная обстановка на Урале в целом свидетельствует о значительном загрязнении окружающей среды как естественными, так и искусственными радионуклидами, которое усугубляется сильным загрязнением региона тяжелыми металлами [Особенности…], представляло интерес исследовать уровни радиационного загрязнения в зонах воздействия крупных ядерных объектов, таких как Производственное объединение «Маяк» и Белоярская атомная электростанция им. Курчатова. В связи с этим тритий как один из основных загрязнителей окружающей среды в зоне таких предприятий стал объектом данного исследования.

Для оценки воздействия Производственного объединения «Маяк» на водные экосистемы был проведен анализ уровней концентраций трития в водоемах производственного и комплексного назначения, дождевых и снеговых осадках на промышленной и удаленных от предприятия территориях, источниках питьевого и хозяйственного водоснабжения, некоторых речных экосистемах (Теча, Мишеляк), а также в организме людей. Выявлено, что наиболее высокая степень загрязнения радионуклидом наблюдаются в водоемах производственного назначения (Теченский каскад водоемов), в которых концентрация трития снижается вниз по течению в среднем от 6000 до 800 Бк/л (2007–2009). Установлено наличие экспоненциальной зависимости концентраций трития в воде

Теченского каскада водоемов от расстояния их до истока р. Течи, свидетельствующей о том, что эти водоемы, включая водоем В-2, объединены в единую гидрографическую сеть, по которой происходит миграция трития от верховья в сторону плотины П-11. Сравнение полученных данных с более ранней известной в литературе информацией позволило отметить тенденцию к снижению средних концентраций радионуклида в водоемах Теченского каскада во времени для периода наблюдений 2005–2009 гг.

На примере 39 водоемов комплексного назначения, не подвергающихся непосредственному воздействию слаборадиоактивных вод ПО «Маяк» и используемых для различных народнохозяйственных целей, показана вариабельность уровней концентраций трития от 7 до 228 Бк/л при среднем значении 28 ± 8 Бк/л. Установлено, что концентрация радионуклида в воде озер снижается по мере удаления от предприятия, при этом наибольшие значения наблюдались в озерах, расположенных вблизи ПО «Маяк» (Татыш, Улагач, Нанога). На примере 10 озер в течение 20-летнего периода наблюдений (1982–2006) выявлена тенденция к снижению концентраций трития во времени от 2 до 16 раз.

Исследование дождевых осадков на промышленной территории ПО «Маяк» в течение 2012 г. показало заметную вариабельность концентраций трития – от 7 до 1160 Бк/л (площадка 18) и от 20 до 2086 Бк/л (площадка 307). На обеих площадках основная часть проб (95 %) по содержанию радионуклида не превышала 800 Бк/л. Дождевые осадки в условно контрольном районе (г. Чебаркуль) имели значительно более низкие концентрации трития по сравнению с промышленной территорией (5–30 Бк/л). В обоих случаях средние концентрации радионуклида в дождевых осадках превышали уровень техногенного фона для Уральского региона: на площадках ПО «Маяк» – в 70–80 раз, а в районе г. Чебаркуль – в три раза.

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 при прохождении через воздушное пространство. Исследования, проведенные на территории радиусом более 30 км вокруг ПО «Маяк», показали, что содержание трития в снеговой воде изменяется в широких пределах – от 6 до 262 Бк/л. Выявлено снижение концентрации радионуклида в снеговой воде в зависимости от расстояния до предприятия при высоком уровне значимости. При этом показано, что средняя концентрация

трития в снеговой воде имеет наиболее высокий показатель для северного (137 ± 32 Бк/л) и восточного (106 ± 40 Бк/л) 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. Практически во всех пробах воды из снега концентрации трития были выше уровня техногенного фона, что свидетельствует о вкладе ПО «Маяк» в формирование этого загрязнения.

Качество питьевой воды является важным условием, необходимым для здоровья населения. Исследования, проведенные в 45-километровой зоне вокруг ПО «Маяк», показали, что в воде скважин средняя концентрация трития (35 Бк/л) в 3,5 раза выше, чем в воде колодцев (10 Бк/л), при этом для всей совокупности данных концентрация радионуклида возрастает с глубиной источника. Последнее, очевидно, свидетельствует о преимущественном поступлении трития в скважинную воду данного региона из глубинных внутрипочвенных горизонтов.

Поскольку значительная часть населения употребляет воду из централизованных источников, куда она подается из различных природных резервуаров (артезианские скважины, открытые водоемы, например оз. Аракуль, Иртяш, Сугамак, Зацепинский пруд), содержание трития в воде разных населенных пунктов зависит от радиационной чистоты соответствующих водных источников. Как показали исследования, содержание трития в воде центрального водоснабжения в 13 населенных пунктах варьирует от уровня техногенного фона до 60 Бк/л. Наиболее высокие значения концентраций отмечены для населенных пунктов Касли, Новогорный, Худайбердинск, Кызылбулак, Вишневогорск. В родниковой воде на момент исследований концентрации трития варьировали от уровня техногенного фона до 44 Бк/л, при этом повышенные показатели отмечены в родниковой зоне, приближенной к ПО «Маяк» (Кыштым, Рудник, Татыш).

Важным водным объектом в зоне воздействия ПО «Маяк» является р. Теча. Особенностью реки является радиоактивное загрязнение ее поймы различными радионуклидами, возникшее в результате сброса в реку жидких отходов предприятия в первые годы его становления и развития [Мокров, 2002а; Мокров, 2002б]. Исследования концентрации трития в речной воде в 2005 и 2010 гг. показали повышенные концентрации радионуклида на всем протяжении реки, превышающие уровень техногенного фона в среднем от 10 до 70 раз.

В соответствии с программой реабилитации загрязненной территории для снижения поступления радионуклидов в питьевую воду жителей населенных пунктов, расположенных вдоль загрязненной реки, были пробурены глубинные скважины (до 100–180 м), из которых вода подается в колонки, расположенные на территории населенных пунктов. Как оказалось, сетевая вода в колонках практически на всем протяжении реки содержит в 2–3 раза больше трития, чем вода личных колодцев и скважин, имеющих меньшую глубину. Полученный результат исследования можно объяснить тем, что р. Теча протекает в зоне разлома земной коры, по которой в пробуренные скважины попадает вода из производственных водоемов с более высокими концентрациями радионуклида, тогда как колодцы и менее глубокие личные скважины в пойме реки подпитываются отчасти за счет воды р. Теча, атмосферных выпадений и поверхностных вод прилегающей территории, поэтому концентрация трития в них меньше.

Исследование уровней тритиевого загрязнения р. Мишеляк, протекающей по южной границе санитарно-защитной зоны ПО «Маяк» и перекрывающей поток фильтрационных вод в южном направлении от производственных водоемов ПО «Маяк», в 2007–2009 гг. выявило повышенные концентрации радионуклида, которые изменялись в пределах 30–230 Бк/л и незначительно варьировали на протяжении всей реки. В наблюдательных скважинах, расположенных в пойме реки, надфоновое тритиевое загрязнение изменялось от 9 до 423 Бк/л при среднем значении ~100 Бк/л. Повышенные концентрации трития во внутригрунтовых водах в южном направлении от ПО «Маяк» могут служить источником тритиевого загрязнения питьевых вод пос. Новогорный, Кызылбулак, Худайбердинский.

При всех способах попадания в организм человека (ингаляция, с пищей и пищевыми жидкостями, через кожу) тритиевая вода быстро всасывается в кровь и разносится кровеносной системой во все органы и ткани тела. Часть трития в результате биохимических процессов постепенно переходит в устойчивые органически связанные соединения, трудно выводимые из организма. Поэтому изучение закономерностей поступления трития в организм человека в районах размещения предприятий ЯТЦ является важной научной и практической задачей. Исследования, проведенные на территории, расположенной в разных направлениях и на разном расстоянии от ПО «Маяк», показали, что в 2008 г. содержание

трития в моче людей варьировало в зависимости от расстояния до предприятия (в среднем от 100 до 800 Бк/л). Наиболее высокие значения отмечались для жителей г. Озерска, п. Татыш, Кыштым, расположенным близко от предприятия, а наиболее низкие – для относительно более удаленных территорий (Касли, Метлино). Дозы внутреннего облучения от инкорпорированного трития колебались в пределах 3–14 мкЗв/год, что составляло 0,3–1,4 % от предела дозы для населения (1 мЗв/год). У людей г. Озерска, не работающих на предприятии, содержание трития в моче было заметно ниже, чем у всей совокупности испытуемых. Предполагается, что основным источником поступления трития в организм человека являются воздушные выбросы предприятия.

Другим важным объектом атомной энергетики на Урале является Белоярская АЭС им И. В. Курчатова. Мониторинг радиоэкологической ситуации по тритию в зоне БАЭС проводился в 1980–2015 гг. и включает периоды индивидуальной и совместной работы разных энергоблоков. Анализ полученных данных по водоему-охладителю позволил выявить уровни загрязнения воды, которые превышали величину техногенного фона практически во всех точках наблюдений, включая верховье водоема. В разное время наблюдений в верховье концентрация радионуклида изменялась от уровня техногенного фона до 60–70 Бк/л, в районе плотины – до 93, в зоне подогрева – до 105, в районе Биофизической станции – до 1000 Бк/л. В период с 1980 по 2003 г. прослеживалась тенденция к снижению концентрации трития в воде Белоярского водохранилища, которая особенно четко проявилась после вывода из эксплуатации 2-го энергоблока (1998 г.), когда содержание радионуклида в воде снизилось примерно в два раза.

С момента пуска Белоярской АЭС в качестве природного фильтра на пути слаборадиоактивных стоков станции служила болотно-речная экосистема, расположенная в 5–7 км от АЭС, включающая в себя Ольховское болото и небольшую речку Ольховку, впадающую в р. Пышму. В болото выведен искусственный канал, в который длительное время поступали сбросные воды станции. Через сбросной канал в болото производится контролируемый сброс технологических вод АЭС после прохождения через водоочистные сооружения. Исследования 1981–1982 гг., в период совместной работы 1-го и 2-го энергоблоков, свидетельствуют о сравнительно высоких концентрациях трития на всей протяженности болотно-речной экосистемы, которые варьировали в пределах нескольких порядков величин

(40–30000 Бк/л). При этом концентрации радионуклида на верхнем участке болота были в среднем в два раза выше, чем на нижнем, что объясняется разбавлением сбросных вод водой подземных источников из тектонического разлома земной коры. В период совместной работы 2-го и 3-го энергоблоков концентрация трития в воде была в среднем в три раза больше, чем после остановки 2-го энергоблока, когда работал только 3-й энергоблок. Показано, что при длительном транзите загрязненной тритием воды через торфяную залежь Ольховского болота часть трития поглощается грунтом и удерживается в нем, находясь в состоянии динамического равновесия. Для предотвращения вымывания радионуклидов в речную сеть атомной станцией были проведены работы по реконструкции сбросов: дебалансные воды были выведены в нижнюю часть болота. В результате этого мероприятия содержание воды в болоте сократилось, обозначилось русло, впадающее в р. Ольховку. Картирование болота по тритию в 2003 г. показало снижение концентрации радионуклида на значительной части его территории. Однако в некоторых местах тритий еще обнаруживался в повышенных количествах (до 800–1300 Бк/л). В целом снятие с эксплуатации 1-го и 2-го энергоблоков, а также реконструкция сбросов в Ольховское болото заметно улучшили ситуацию по тритию и другим радионуклидам в исследуемой болотно-речной экосистеме, что положительно повлияло на радиоэкологическое состояние региона.

Река Пышма, принимающая на себя стоки из Белоярского водохранилища и Ольховской болотно-речной экосистемы, несет в себе радионуклид в концентрациях, в среднем от 2 до 20 раз превышающих уровень техногенного фона. После снятия с эксплуатации 1-го и 2-го энергоблоков наблюдается постепенное снижение концентрации трития в речной воде, однако в отдельные периоды времени наблюдались всплески повышенных концентраций вниз по течению реки, связанные с неконтролируемыми сбросами. В пойменной части реки надфоновое тритиевое загрязнение поступает в питьевую воду колодцев и скважин. Концентрация трития в колодезной воде достоверно снижается с увеличением расстояния населенного пункта от плотины Белоярского водохранилища и с увеличением глубины источника. Содержание радионуклида в воде личных скважин имеет тенденцию к снижению с глубиной и практически не зависит от расстояния.

Экспериментально установлено, что в районе расположения Белоярской АЭС тритий в надфоновых концентрациях мо-

жет загрязнять воздушную среду. Для подтверждения этого факта на крыше Биофизической станции Института экологии растений и животных УрО РАН и в помещении лаборатории устанавливали экспериментальные сосуды с дистиллированной водой, которая использовалась в качестве поглощающей среды. Установлено, что тритий из воздуха может поступать внутрь зданий, которые дольше очищаются от трития, чем открытое наружное пространство.

Результаты мониторинга концентраций трития в дождевых и снеговых осадках зоны расположения БАЭС позволили выявить вариабельность показателей (от уровня техногенного фона до 500 Бк/л и более), обусловленную количеством работающих энергоблоков, временем отбора и расстоянием места отбора проб от источника загрязнения.

Исследование радиоэкологического состояния питьевых вод в районе атомной станции, проводившийся с 1981 г., выявило наличие надфоновых концентраций трития в большинстве питьевых источниках по сравнению с уровнем техногенного фона. Показано, что на территории, прилегающей к южной оконечности Белоярского водохранилища и р. Пышме, формируется зона повышенного содержания радионуклида в питьевой воде колодцев и скважин по сравнению с более удаленной территорией. Экспериментально установлена достоверная корреляционная связь между концентрацией трития в питьевой воде и моче людей. На примере жителей г. Заречный определены уровни концентраций трития в моче людей (2–65 Бк/л, среднее – 39 Бк/л), и показана их зависимость от возраста испытуемых.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

Алексахин Р. М. Ядерная энергия в биосфере. М. : Энергоиздат, 1982. 215 с.

Атлас геоэкологических карт на территории зоны наблюдения ФГУП ПО «Маяк». Озерск, 2007. 106 с.

Баллонов М. И., Чипига Л. А. Оценка дозы от поступления окиси трития в организм человека: роль включения трития в органические вещества тканей // Радиационная гигиена. 2016. Т. 9, № 4. С. 16−24.

Бейли Н. Статистические методы в биологии. М. : Сов. наука, 1959. 270 с.

Беловодский Л. Ф., Гаевой В. К., Гришмановский В. И. Тритий. М. : Энергоиздат, 1985. 248 с.

Белоярская АЭС готова начать строительство энергоблока 5 в 2030 году. URL: https://tass.ru/ural-news/9577155 (дата обращения: 15.09.2021).

Бескрестнов Н. В., Фатькин А. Г., Колтик И. И. Опыт организации дозиметрического контроля за водоемом-охладителем АЭС // Проблемы радиоэкологии водоемов-охлади телей атомных электростанций. Свердловск : Урал. науч. центр АН СССР. 1978. 43 с.

Богданов К. М. Определение общей активности трития в живом организме // Мед. радиология. 1975. № 1. С. 89.

Виноградов А. П., Девирц А. Л., Добкина Э. И. Современное состояние трития в природных водах // Геохимия. 1968. № 10. С. 1147–1161.

Влияние АЭС на радиоэкологическое состояние водоема-охладителя / А. В. Трапезников, М. Я. Чеботина, В. Н. Трапезникова и др. Екатеринбург : Изд-во «АкадемНаука», 2008. 400 с.

Генетические структуры и тритий / Г. С. Мушкачева, Г. Г. Русинова, К. Н. Муксинова и др. М. : Энергоатомиздат, 1994. 192 с.

Геохимическая специализация осадков (накипей) водных источников на примере двух регионов Сибири / А. Э. Тапхаева, Т. Т. Тапсаев, Л. П. Рихванов и др. // Сиб. радиоэколог. журнал. 2010. № 4. С. 685–696.

Григорьева Л. И., Томилин Ю. А. Оценка степени загрязнения тритием поверхностных водоемов и некоторых источников питьевой воды в районе Южно-Украинской АЭС // Укр. радиолог. журнал. 1999. № 4. С. 433−437.

Гудков Д. И. Динамика содержания трития в пойменных водоемах р. Припять и пруде-охладителе Чернобыльской АЭС // Радиационная биология. Радиоэкология. 1999. Т. 39, № 6. С. 605−608.

Давыдочкина А. В. Мониторинг трития в экосистемах Северо-Запада России : дис. ... канд. геогр. наук. Санкт-Петербург, 2014. 159 с.

Демин С. Н. Тритиевая проблема – гигиенические аспекты // Тритий – это опасно. Челябинск : Изд-во «Челябинский дом печати», 2001. С. 13−21.

Демин С. Н., Телушкина Е. Л. Поведение в окружающей среде и биологическое действие трития // Проблемы радиоэкологии. 1987. № 1. С. 23−28.

Дерпгольц В. Ф. Мир воды. Ленинград : Изд-во «Недра», 1979. 254 с.

Довгуша В, В., Тихонов М. Н. Радионуклиды в пространстве северо-западного региона России: системный взгляд на проблему. URL: http://yandex.ru//yandsearch?lr... (дата обращения: 10.12.2014).

Дозиметрический и радиометрический контроль при работе с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений: метод. руководство в 2-х томах / под ред. В.И. Гришмановского. М. : Энергоиздат, 1980. Т. 2. 204 с.

Егоров Ю. А. Еще раз о тритии, образующемся при работе АЭС, и его переносе в окружающей АЭС среде // Экология регионов атомных станций. М. : АЭП, 1996. С. 237−250.

Егоров Ю. А. Тритий в природно-техногенной среде. «АЭС – окружающая среда» // Регион. экология. 2002. № 1−2. С. 7–13.

Екидин А. А., Антонов К. Л., Жуковский М. В. Оценка загрязнения атмосферы тритием при испарении воды с поверхности промышленных водоемов // Вопр. радиац. безопасности. 2012. № 3. С. 3−10.

Ершов А. В., Силин И. И. Проблемы качества подземных питьевых вод Калужской области на урбанизированных территориях и меры по их целенаправленному применению и улучшению // Вестн. нов. мед. технологий. 2005. Т. XII, № 3−4. С. 125–129.

Журавлев В.Ф. Органически связанный тритий // Мед. радиология. 1981. Вып. 26. № 6. С. 67.

Закономерности пространственного распределения ^{90}Sr и ^{137}Cs в пойменных ландшафтах р. Теча / П. М. Стукалов, А. И. Смагин, В. И. Рерих и др. // Вестн. НЯЦ РК: Радиоэкология. Охрана окружающей среды. 2004. Вып. 3. С. 26−31.

Иваницкая М. В., Малофеева А. И. Источники поступления трития в окружающую среду // Тритий – это опасно. Челябинск : Челяб. Дом печати, 2001. С. 22−29.

Изучение содержания трития в водных объектах и приземной атмосфере в районе Калининской АЭС / Н. Н. Дельвин, А. Б. Иванов, В. А. Крылов и др. // Экология регионов атомных станций. 1996. Вып. 5. С. 264−265.

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 : ООО «Бизнес-проспект». 2005. С. 410−422.

Источники и действие ионизирующей радиации / Доклад за 1977 г. Генеральной ассамблее с приложениями Научный комитет Организации Объединенных Наций по действию атомной радиации. Нью-Йорк, 1978. 382 с.

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.

Концептуальная модель и многолетние результаты радиоэкологического мониторинга зоны влияния жидких сбросов Белоярской атомной электростанции / Л. Н. Михайловская, А. В. Коржавин, В. Н. Трапезникова и др. // Мед.-биол. и соц.-псих. проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. 2020. № 3. С. 68−75.

Кочетков О. А., Монастырская С. Г., Кабанов Д. И. Проблемы нормирования техногенного трития (обзор) // Саратовский научно-медицинский журнал. 2013, Т. 9, № 4. С. 815–818.

Купцов В. М. Природные изотопы как индикаторы глобальных и региональных процессов движения воды на Земле / В. И. Ферронский, В. С. Брезгунов, В. Г. Онуфриев и др. // Вод. ресурсы. 1975. № 6. С. 3−29.

Ларин В. Тритиевая проблема на комбинате «Маяк» // Энергия. 2002. № 6. С. 44−49.

Латынова Н. Е. Загрязнение компонентов наземных экосистем ^{3}H, ^{90}Sr, ^{137}Cs и ^{226}Ra в результате нарушения многобарьерной защиты хранилищ радиоактивных отходов : автореф. дис. … канд. радиобиол. наук. Обнинск, 2009. 153 с.

Ленченко В. Г., Сажина Л. А., Шилкова Е. В. Санитарно-гигиенический очерк реки Пышмы и Белоярского водохранилища // Материалы XIII науч. сессии Свердл. НИИ гигиены труда и профпатологии. Свердловск, 1964. С. 102−106.

Маковский В. И., Нифонтова М. Г., Новогородцева Н. Н. Аккумулятивная роль Ольховского болота в зоне воздействия Белоярской АЭС // Влияние Ольховского болота на экологическое состояние района расположения Белоярской АЭС. Екатеринбург : Изд-во «Полиграфист». Препринт. 1991. С. 3−24.

Миграция радионуклидов в пресноводных и наземных экосистемах / А. В. Трапезников, И. В. Молчанова, Е. Н. Караваева и др. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2007. 400 с.

Моисеев А. А., Иванов В. И. Справочник по дозиметрии и радиационной гигиене. М. : Атомиздат, 1974. 336 с.

Мокров Ю. Г. Реконструкция и прогноз радиоактивного загрязнения реки Теча // Библиотека журнала «Вопросы радиационной безопасности». Озерск, 2002а. № 2. Ч. 1. 173 с.

Мокров Ю. Г. Реконструкция и прогноз радиоактивного загрязнения реки Теча // Библиотека журнала «Вопросы радиационной безопасности». Озерск, 2002б. № 2. Ч. 2. 142 с.

Молчанова И. В., Караваева Е. Н., Куликов Н. В. Некоторые итоги радиоэкологического изучения природных экосистем в районе Белоярской АЭС // Экология. 1985. № 5. С. 30−34.

Молчанова И. В., Караваева Е. Н., Михайловская Л. Н. Итоги многолетних радиоэкологических исследований природных экосистем в зоне жидких сбросов Белоярской атомной электростанции // Вопр. радиац. безопасности. 2009. № 4. С. 19−27.

Момот О. А., Сынзыныс Б. И. Оценка риска для здоровья при употреблении питьевой воды, содержащей малые количества трития // Вестн. Калуж. ун-та. 2017. № 2(35). С. 96–100.

Мурашова Е. Л., Чудин В. А. Оценка содержания трития в организме взрослого населения города Озерска // Вопр. радиац. безопасности. 2002. № 4. С. 57−60.

Нифонтова М. Г., Маковский В. И., Куликов Н. В. ^{90}Sr и ^{137}Cs в торфяных отложениях низинного болота в зоне влияния Белоярской АЭС // Экология. 1986. № 3. С. 30−35.

Окись трития / под ред. Ю. И. Москалева. М. : Атомиздат. 1968. 396 с.

Особенности радиационной обстановки на Урале / В. И. Уткин, М. Я. Чеботина, А. В. Евстигнеев и др. Екатеринбург : УрО РАН, 2004. 150 с.

Плохинский Н. А. Биометрия. Новосибирск : Изд-во Сиб. отделения АН СССР, 1978. 370 с.

Природно-техногенные гидрохимические аномалии в подземных водах севера Калужской области / О. А. Момот, Г. В. Лаврентьева, Б. И. Сынзыныс и др. // Проблемы регион. экологии. 2012. № 1. С. 46−52.

Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 1999 г. : ежегодник / под ред. К. П. Махонько. СПб. : Росгидромет, 2001. 330 с.

Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2003 г. Росгидрометеоиздат, 2004. 273 с.

Радиоактивное загрязнение территории СССР в 1986 г. / под ред. К. П. Махонько. Обнинск : НПО «Тайфун», 1987. С. 18.

Распределение ^{90}Sr и ^{137}Cs по компонентам болотно-речной экосистемы / И. В. Молчанова, Е. Н. Караваева, М. Я. Чеботина и др. // Экология. 1982. № 2. С. 45−49.

Садовников В. И., Глаголенко Ю. В., Дрожко Е. Г. Современное состояние и пути решения проблем Теченского каскада водоемов // Вопр. радиац. безопасности. 2002. № 1. С. 3−14.

Санитарные правила работы с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений (№ 333-60). М. : Госиздат, 1960. 118 с.

Смагин А. И. Экология водоемов в зоне техногенной радионуклидной геохимической аномалии на Южном Урале. Челябинск : Изд. центр ЮУрГУ, 2013. 205 с.

Смагин А. И. Экология промышленных водоемов предприятия ядерного топливного цикла на Южном Урале. Озерск : Ред.-изд. центр ВРБ, 2007. 190 с.

Состав, свойства и уровень радиоактивного загрязнения почвенного покрова 15-километровой зоны Белоярской АЭС / И. В. Молчанова, С. Ю. Кайгородова и др. // Журнал Сибир. федер. ун-та. 2016. № 9. С. 321−337.

Список АЭС мира. URL: ru.wikipedia.org. (дата обращения: 15.03.2018).

Старков О. В., Моисеева О. В. Пространственно-временная миграция трития на территории промплощадки ГНЦ РФ-ФЭИ и ее окрестностей // Ядерная и радиационная безопасность России : информ. бюллетень. М. : ЦНИИатоминформ, 2002. С. 64−75.

Стрелков Р. Б. Метод вычисления стандартной ошибки и доверительных интервалов средних арифметических величин с помощью таблицы. Сухуми : Алашара, 1966. 15 с.

Стукалов П. М. Радиоактивное загрязнение промышленного водоема ПО «Маяк» Старое болото. Обзор результатов исследовательских работ (1949–2006 годы) // Библиотека журнала «Вопросы радиационной безопасности». № 10. Озерск : РИЦ ВРБ, 2007. 136 с.

Стукалов П. М., Алексахин А. И., Иванов И. А. Радиоактивное загрязнение поверхностных водных систем района расположения предприятия ФГУП «ПО Маяк» // Всерос. НИИ тех. физики : [офиц. сайт]. URL: www.vniitf.ru/downloads/miass/present_ppt/wed/stukalov.ppt (дата обращения: 14.11.2011).

Стыро Д. Б., Коротков В. П. Объемная активность трития в водах Балтийского моря в 1987–1989 гг. // Атомная энергия. 1994. Т. 76. Вып. 5. С. 441−443.

Субботин С. Б. Влияние радиоактивного загрязнения подземных вод на радиоэкологическую обстановку бывшего Семипалатинского испытательного полигона : автореф. дис. … канд. геоэкол. наук. М., 2015. 26 с.

Тетчер Л., Пейн Б., Камерон Дж. Тенденции в глобальном распределении трития начиная с 1961 г. // Радиоактивные выпадения от ядерных взрывов. пер. с англ. / под ред. Ю. А. Израэля. М. : Мир, 1968. 284 с.

Тритиевые исследования природных вод в России / В. Н. Сойфер, В. А. Горячев, С. М. Вакуловский и др. М. : ГЕОС, 2008. 286 с.

Тритий – это опасно. Челябинск : Изд-во «Челябинский дом печати», 2001. 59 с.

Тритий в атмосферных осадках, реках и морях, омывающих территорию Советского Союза / С. М. Вакуловский, А. И. Воронцов, А. И. Катрич и др. // Атомная энергия. 1978. Т. 44. Вып. 5. С. 432–435.

Тритий в воде колодцев и скважин района производственного объединения «Маяк» / М. Я. Чеботина, О. А. Николин, А. И. Смагин и др. // Урал. геофиз. вестн. 2007. № 4. С. 95−97.

Тритий в водоемах производственного и комплексного назначения в районе ПО «Маяк» на Урале / М. Я. Чеботина О. А. Николин, А. И. Смагин и др. // Водное хозяйство России. 2011. № 4. С. 75−84.

Тритий в моче людей в зоне влияния Белоярской АЭС / М. Я. Чеботина, О.А. Николин, Л. Г. Бондарева и др. // Радиац. гигиена. 2016. Т. 9, № 4. С. 87−92.

Тритий в окружающей среде Игналинской АЭС / И. Мажейка, Р. Петрошюс, Р. Ясюленис и др. // Атомная энергия. 1993. Т. 75. Вып. 6. С. 471.

Тритий в реках умеренных широт северного полушария / Т. Н. Жигаловская, И. А. Колосков и др. // Тр. Ин-та эксперементальной метеорологии гл. упр. гидрометеослужбы при Сов. министров СССР, 1976. Вып. 4 (56). С. 21.

Тритий и его соединения. Контроль величины индивидуальной эффективной дозы. МУ 2.6.1. 15-02. Министерство РФ по атомной энергии, Министерство здравоохранения РФ. М., 2004. 27 с.

Усачев В. Д. Тритий в промышленных водоемах ПО «Маяк» // Тритий – это опасно. Челябинск, 2001. С. 41−56.

Уткин В. И. Газовое дыхание земли // Сорос. образов. журнал. 1997. С. 57−64.

Финашов Л. В., Востротин В. В., Янов А. Ю. Тритий в моче у жителей города Озерска Челябинской области в 2016 г. // Радиац. гигиена. 2019. Т. 12, № 3. С. 42−49.

Чеботина М. Я. Поступление трития из водоема-охладителя в источники питьевого водоснабжения путем фильтрации через глубинные слои подстилающих пород // ДАН. 2011. Т. 438, № 5. С. 675−677.

Чеботина М. Я., Гусева В. П., Трапезников А. В. Планктон и его роль в миграции радионуклидов в водоеме-охладителе АЭС. Екатеринбург : УрО РАН, 2002. 168 с.

Чеботина М. Я., Кулигин А. П., Реч Т. А. Поступление трития от БАЭС в водные экосистемы // Безопасность эксплуатации Белоярской АЭС. Екатеринбург : УрО РАН, 1994. С. 187−191.

Чеботина М. Я., Николин О. А. Радиоэкологические исследования трития в Уральском регионе. Екатеринбург : УрО РАН, 2005. 90 с.

Чеботина М. Я., Николин О. А. Современные уровни концентраций трития в моче людей в зоне предприятий ядерно-топливного цикла // ДАН. 2012. Т. 447, № 6. С. 691−692.

Чеботина М. Я., Николин О. А. Тритий в водной системе реки Теча // Радиационная биология. Радиоэкология. 2015. Т. 56, № 1. С. 102−106.

Чеботина М. Я., Николин О. А., Мурашова Е. Л. Поступление трития на земную поверхность с дождевыми осадками // Вод. хозяйство России. 2012. № 5. С. 76−87.

Чеботина М. Я., Николин О. А., Мурашова Е. Л. Современные уровни концентраций трития в промышленных водоемах ФГУП ПО «Маяк» // Вопр. радиац. безопасности. 2010. № 4. С. 55−58.

Чеботина М. Я., Николин О. А., Смагин А. И. Тритий в водоемах района расположения ПО «Маяк» // Вопр. радиац. безопасности. 2005. № 1. С. 79−84.

Чеботина М. Я., Николин О. А., Смагин А. И. Тритий в источниках питьевого водоснабжения жителей района ПО «Маяк» // Вопр. радиац. безопасности. 2008. № 2. С. 82−86.

Чеботина М. Я., Николин О. А., Смагин А. И. Тритий в снеговом покрове в зонах воздействия предприятий ядерно-топливного цикла на Урале // Водное хозяйство России. 2014. № 2. С. 102−113.

Чеботина М. Я., Реч Т. А., Куликов Н. В. Тритий в зоне Белоярской АЭС // Экология. 1990. № 2. С. 34−39.

Чиркова В. Г. О методах концентрирования при измерении трития в природных водах // Тр. Ин-та эксперимент. метеорологии. 1947. Вып. 3 (42). С. 105.

Чуйков Ю. С., Досмухамедова Г. Г. Объект «Вега» и последствия ядерных взрывов в мирных целях (Обзор) // Астрахан. вестн. эколог. образования. 2006. № 1-2 (8-9). С. 46–71.

Штуккенберг Ю. М. Применение трития в биологических исследованиях. М., Академия медицинских наук. 1960. 56 с.

Эванс Э. Тритий и его соединения / пер. с англ. М. : Атомиздат, 1970. 312 с.

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. // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2003. № 2. С. 67−72.

Янов А. Ю., Востротин В. В., Финашов Л. В. Тритий в окружающей среде Уральского региона: обзор современного состояния и анализ перспектив изучения с позиций радиологической защиты // Человек. Спорт. Медицина. 2016. Т. 16, № 2. С. 85–99.

Ярушина М. И., Гусева В. П., Чеботина М. Я. Видовой состав и экологическая характеристика водорослей водоема-охладителя Белоярской АЭС // Экология. 2002. № 1. С. 23−29.

A Data Base for Tritium Level around a Chronic Source / Dan. Galeriu, N. Paunescu, N. Mocanu et al. // Report WP3 IDRANAP 58-03/2003.

Adams L. W., Peterle T. J., White G. C. Tritium behavior in aquatic plants and animals in a freshwater ecosystems // Behavior of tritium in the environment. IAEA, Vienna, 1979. P. 231.

Baumgartner F., Kardinal Ch., Mullen G. Distribution of tritium between water and exchangeable hydrogen bridges of biomolecules // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2001. Vol. 249, № 2. P. 513−517.

Baumgartner F., Kim M. A. Tritium-protium fractionation near and inside DNA // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2000. Vol. 249, № 2. P. 295−298.

Bleylock B. G., Frank M. L. Distribution of tritium in a chronically contaminated lake // Behavior of tritium in the environment. Proceedings of a Simposium San Francisco, 16–20 Oktober 1978. International Atomic Energy Agency, Vienna, 1979. P. 247.

Bogen D. C., Welford G. A. Fallout tritium destribution in the environment // Health Physics. 1976. Vol. 30. P. 203.

Canadian Drink Water Standarts. Tue. 5 Nov. 1996.

Chebotina M., Nikolin O., Bondareva L. Current Level of Tritium Concentrations in the River Techa and in Drinking Water Sources in Coastal Areas // Global J. for Research Analysis. 2015. Vol. 4. P. 6−10.

Cohen L. K., Kneip T. J. Environmental tritium studies at a PWR power plant // Tritium / eds. A. A. Moghissi, M. W. Carter. Messenger Graphics, 1973. P. 632.

Determination of Total Tritium in Urine from Residents Living in the Vicinity of Nuclear Power Plants in Qinshan, China / Bao-Ming Shen, Yan-Qin Ji, Qing Tian et al. // Int. J. Environ Res Public Health. 2015. Vol. 12(1). P. 888−894.

Drinking Water – Radionuclide Contamination. Florida, Departament Protection. 2003.

Effect of micronizing full fat canola seed on amino acid disappearance in the gastrointestinal tract of dairy cows / Y. Wang, T. A. McAllister, M. D. Pickard et al. // J. Dairy Sci. 1999. Vol. 82 (3). P. 537−544.

Elwood J. W. Tritium behavior in fish from a chronically contaminated lake // Radionuclides in ecosystems. National Technical Information Service / ed. D. J. Nelson. Springfield, 1971. P. 435.

Environmental isotopic data: world survey of isotope concentrations in precipitation. № 1 (1953–1963); № 2 (1964–1965); № 3 (1966–1967); № 4 (1968–1969). IAEA, Vienna, 1969, 1970, 1971, 1973.

Fairlie L. A hypothesis to explain childhood cancer near nuclear power plants // J. Environ. Radioact. 2014. Vol. 133. P. 10−17.

Farlane M. C., Beckert W. F., Brown K. W. Tritium in plants // J. Environ. Qual. 1979. Vol. 8. P. 269.

Garbinsky L., Psenicka L. Vyuzitie monitorov radoiaktivity v zivotnom prostredi / Zb. 4-Vcd. Konf. SVST: Tvorba a jchr. Zivot. Prostred., Bratislava, 1979. Zvaz. 1. Bratislava, 1979. P. 260.

Hanf R. W. Kelly L. M. Radiological superveillance of Handford Site Drinking water // Annual Environmental Report. 2001. Report № 4.3.

Ichimasa Y., Ikushima T., Tezuka H. Summary update of the Brookhaven tritium toxicity program with emphasis on recent cytogenetic and life-shortening studies // ed. S. Okada. Tritium radiobiology and health physics, proceedings of the third Japan-US workshop. Nagoya: Institute of Plasma Physics, Nagoya University; Report No. IPPJ-REV-3. 1989. P. 239−250.

Jones W. M. Vapor pressures of tritium oxide and deuterium oxide. Interpretation of isotope effect // J. Chem. Phys. 1968. Vol. 48. P. 207.

Kaufman S., Libby W. F. The natural distribution of tritium // Phys. Rev. 1954. Vol. 93, № 6. P. 1337−1344.

Kolb N. Radionuclide concentrations in ground level air from 1971 to 1973 in Brunswick and Tromso // Physical-Technische Budesanst talt report PTB-Ra-4. Brunschweig, 1974, September.

Kotzer T., Trivedi T. Dosimetric implications of atmospheric dispersal of tritium near a heavy-water research reactor facility // Radiat. Prot. Dosimetry. 2001. Vol. 9, № 9. P. 61−66.

Miyake Y., Saruhashi K., Brown K. W. Seasonal variation of tritium fractionation and ^{90}Sr fallout on the Earth // Radiat. Res. 1980. Vol. 21. P. 68.

Moghissi A. A., Brethauer E. W., Patzer R. G. Biological concentration of ^{3}H // Health Phys. 1987. Vol. 53. P. 385–388.

Moghissi A. A., Cothern C. R. Background information for the development of a standart for tritium in drinking water // Radiation Protection Dosimetry. 1986. Report 16. P. 175−179.

Momot O., Synzynys B., Kozmin G. Pollution of ground sources of drinking water with technogenic tritium // Dangerous Pollutants (Henobiotics) in Urban Water Cycle / eds. Hlavinek et al. Springer, 2008. P. 331–340.

NCRP – National Council on Radiation Protection an Measurenments // Tritium in Environment. Report 62. Washington, 1979.

Okada S., Momoshimat N. Overview of tritium: characteristics, sources, and problems // Health Phys. 1993. Vol. 65 (6). P. 595−609.

Piel W. F. Ir. The beta-decay of tritium // Nuclear Phys. 1973. F 203. P. 369–387.

Pilmer D. F., Denovan J. T. Comprasion of predicted and measured radoinuclide concentrations in marine animals near an operating PWR // Trans Amer. Nucl. Soc., 1972. Vol. 17, № 1. P. 29.

Pinson E. A., Langham W. H. Physiology and toxicology tritium in man // Appl. Physiol. 1957. № 10. P. 108−126.

Puhakainen M., Heikkenen T. Tritium in urine in Finnish people // Radiat. Prot. Dosimetry. 2008. № 128. P. 254−257.

Quanti fying the similarities within fold space / A. Harrison, F. Pearl, R. Mott et al. // J. Mol. Biol. 2002. Vol. 323. P. 909–926.

Reference values for radioactivity concentration in drinking water European Unition: Council Directive 98/83/ES of 3 November, 1998 in the quality of water intended for human consumption // Official Journal L. 1998. 330 (05/13/98).

Schell W. R., Gauzay G., Payne W. R. World distribution of environmental tritium // Phys. Behav. Radioactive Contaminated Atmos. Vienna, 1974. P. 375. Discuss., p. 396.

Strack S., Bonotto S., Kirchmann R. Radioactive contamination of the marine environment. Uptake and distribution of ^{3}H in *Dunaliella bioculata* // Helgoland. Meeresuntersuch. 1980. Vol. 33, № 1−4. P. 153.

Suga S. Twenty years of tritium internal monitoring in Japan Atomic Energy Research Institute / J. Akaishi, H. Fukuda, T. Hattori et al. Radiation-risk-protection. Koln : IRPA, 1984. P. 784.

Tazima Y. Biological effects of tritium particularlarly of tritiated water // Radiat. Res. 1980. Vol. 21, № 1. P. 3.

Teegarden B. J. Cosmic-ray produced of deuterium and tritium in the Earth's surface // J. Geophys. Res. 1967. Vol. 72. P. 4863−4867.

Tritium analysis results of urine samples of Wolseong inhabitants living around heavy water reactor. WSNESC Report, 2011.

Weston R. E. Kinetic and equilibrium isotope effects of tritium substitution // Tritium / eds. A. A. Moghissi, M. W. Carter. CONF 710809, Messenger Graphics, Phoenix, AZ and Los Vegas. NV, 1973. P. 289.

Workman W. J., Trivedi A., Cornett R. J. Tritium Concentrations Inside the Homes of Occupationally Exposed Workers // Health Physics. 1998. № 75 (1). P. 56–59.

Yoon S., Ha W. H., Lee S. S. Tritium analysis of urine samples from the general Korean public // Appl. Radiat. Isot. 2013. № 81. P. 276−278.

Научное издание

Чеботина Маргарита Яковлевна

МОНИТОРИНГ ТРИТИЯ В ВОДНЫХ СРЕДАХ УРАЛЬСКОГО РЕГИОНА

Монография

Редактор и корректор *Е. Е. Крамаревская*
Компьютерная верстка *А. Ю. Матвеев*

Подписано в печать .09.2022. Формат 60x84 1/16
Бумага офсетная. Гарнитура Times
Уч.-изд. л. 6,34. Усл. печ. л. 6,98. Тираж 310 экз. Заказ 204.

Издательство Уральского университета
620000, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ
620000, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4
Тел.: +7 (343) 350-56-64, 358-93-22
Факс: +7 (343) 358-93-06
E-mail: press-urfu@mail.ru