

УДК 539.163:574.6:614.876

СОВРЕМЕННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ О РАДИОАКТИВНОМ ЗАГРЯЗНЕНИИ РЕКИ ТЕЧА В 1949–1956 гг.

© 2016 г. М. О. Дёгтева*, Н. Б. Шагина, М. И. Воробьева, Е. А. Шишкина,
Е. И. Толстых, А. В. Аклеев

Уральский научно-практический центр радиационной медицины, Челябинск, Россия

**e-mail: marina@urcrm.ru*

Поступила в редакцию 04.08.2015 г.

Анализ архивных материалов, которые стали доступны в последнее десятилетие, о технологии хранения и переработки жидких радиоактивных отходов на Производственном объединении “Маяк” в 1949–1956 гг. позволил детально восстановить сбросы радионуклидов в р. Теча. Концентрации радионуклидов в воде, донных отложениях и пойменных почвах р. Теча в 1949–1951 гг. были восстановлены с использованием специально разработанной модели речной системы. Модельные расчеты согласуются с данными измерений активности воды и донных отложений, которые проводились на р. Теча с 1951 г. Концентрации ^{90}Sr в воде, рассчитанные по речной модели, согласуются с оценками, полученными ретроспективно из данных измерений ^{90}Sr в зубах и организме жителей прибрежных населенных пунктов. Плотности загрязнения поймы ^{137}Cs , рассчитанные по речной модели, согласуются с оценками, полученными ретроспективно из данных измерений ^{137}Cs в пойменных почвах. Результаты реконструкции загрязнения воды и поймы р. Теча используются в настоящее время для уточнения доз внешнего и внутреннего облучения и оценки риска отдаленных эффектов хронического радиационного воздействия на население.

Ключевые слова: жидкие радиоактивные отходы, р. Теча, радиоактивное загрязнение, донные отложения, пойменные почвы, облучение населения

DOI: 10.7868/S0869803116050039

В 1949–1956 гг. Производственное объединение (ПО) “Маяк” осуществляло сбросы жидких радиоактивных отходов (ЖРО) радиохимического производства в р. Теча. Сбросы производились с разных стадий технологического цикла, при этом некоторые виды сбросов не были рассмотрены проектом. Случались также аварийные сбросы, которые своевременно не были зарегистрированы системой радиационного контроля. В результате этого вода, русло и пойма р. Теча были загрязнены радионуклидами, в том числе долгоживущими. Первые оценки сбросов ЖРО и радиационной ситуации на р. Теча были представлены в работах Д.И. Ильина и А.Н. Мареев [1–4], и до последнего времени других объективных данных о сбросах в р. Теча в открытой литературе не появлялось. Ситуация изменилась в последнее десятилетие, когда было рассекречено и стало доступно для анализа множество архивных документов о развитии атомного производства в СССР. Это отчеты из архива ПО “Маяк” [5–10] и документы из архива президента РФ [11, 12]. Помимо этого, появилось много публикаций, написанных ведущими специалистами ПО “Маяк”, работавшими на комбинате в первые годы его су-

ществования [13–16]. Анализ этих материалов позволил спустя шестьдесят лет детально восстановить уровни сбросов в р. Теча [17, 18].

Долговременное загрязнение системы р. Теча, которое сформировалось в период сбросов 1949–1956 гг., привело к хроническому радиационному воздействию на население, проживавшее в прибрежных населенных пунктах (НП) по течению реки ниже места сбросов. Многолетние эпидемиологические исследования этой когорты выявили избыточные случаи злокачественных опухолей, что позволило оценить риск отдаленных последствий облучения [19, 20]. Уточнение доз облучения жителей населенных пунктов (НП) по р. Теча является в настоящее время актуальной проблемой, решение которой позволит в свою очередь уточнить коэффициенты риска отдаленных медико-биологических эффектов у людей различного пола и возраста. Дозы внешнего облучения и поступление радионуклидов в организм в период проживания на р. Теча в 1950–1956 гг. на 95–99% определили уровни суммарного радиационного воздействия. Поэтому целью настоящей работы являлась реконструкция загрязнения радионуклидами р. Теча в 1949–1956 гг. на основе

детального анализа архивных данных, которые стали доступны в последнее десятилетие.

ОПИСАНИЕ ПО “МАЯК” КАК ИСТОЧНИКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ РЕКИ ТЕЧА

ПО “Маяк” было создано в 1948 г. для получения оружейного плутония и переработки делящихся материалов. В состав предприятия входили: реакторный завод (завод “А”); радиохимическое производство по выделению ^{239}Pu из облученного в реакторе урана (завод “Б”, который включал комплексы хранилищ радиоактивных отходов “С”); химико-металлургическое производство по получению металлического плутония (завод “В”). В начальный период работы комбината происходило быстрое наращивание производства плутония и одновременно доработка технологии его получения. Радиохимическое производство было связано с образованием большого количества ЖРО различной удельной активности. Отсутствие надежных технологий переработки и хранения ЖРО привели к радиоактивному загрязнению в 1949–1956 гг. р. Теча.

Реакторный завод

Началом работы завода А считается 19 июня 1948 г., когда был введен в эксплуатацию первый промышленный реактор (проектной мощностью 100 МВт, загрузкой 120–150 т металлического урана). С апреля 1949 г. достигнутая мощность реактора А составила 170% от проектной [11, 14]. В начале апреля 1950 г. был пущен второй реактор мощностью 300 МВт, а в апреле 1951 г. был введен в эксплуатацию третий реактор такой же мощности [14].

Время облучения урановых блоков в реакторе составляло 3–4 мес. [21]. В реакторе происходила ядерная реакция, в результате которой в облученных блоках получалось небольшое количество плутония. В режиме регулярной (плановой) перегрузки каждый день из активной зоны реактора выгружалось около 1% урановых блоков [21]. После выгрузки из реактора и до передачи на радиохимическую переработку облученные урановые блоки находились в бассейнах выдержки реакторного завода. Согласно технологии, время выдержки должно быть не менее 2 мес. [11], однако в реальности среднее время выдержки в 1949 г. было 38 сут, в 1950 г. – 57 сут и только в 1951 г. достигло величины 63 сут [21]. После выдержки в бассейнах урановые блоки поступали на радиохимическую переработку, поэтому время выдержки соответствовало возрасту продуктов деления урана и определяло активность короткоживущих радионуклидов [22].

Радиохимический завод

Началом работы завода Б считается 22 декабря 1948 г., когда на переработку поступила первая партия облученных урановых блоков. Согласно проекту, радиохимический завод должен был перерабатывать ежедневно 1 т облученного урана и выделять из нее 100 г плутония в растворенном виде [11]. Первая порция раствора плутония была передана на химико-металлургический завод 26 февраля 1949 г. [15]. Завод Б достиг проектной мощности 15 марта 1949 г., и к концу года было выдано 19 кг плутония [11]. Производительность завода возросла в сентябре 1950 г., когда он начал перерабатывать блоки с двух реакторов, и количество плутония в 1950 г. возросло до 69 кг. А к концу 1951 г., когда перерабатывались блоки с трех реакторов, было выдано уже 159 кг плутония [12]. Помимо плутония, продукцией комбината была урановая соль, которая использовалась для регенерации металлического урана [12].

Первой стадией переработки облученного урана было растворение алюминиевых оболочек и самих блоков в азотной кислоте. Процесс растворения сопровождался выделением большого количества радиоактивных аэрозолей, которые поступали в большую железобетонную трубу, где смешивались с вентиляционными сбросами. Летом 1950 г. обнаружили, что в трубе в больших количествах образовывался радиоактивный конденсат, который оседал на внутренних стенках трубы, стекал на дно и просачивался в рабочие помещения завода [13]. Поэтому в августе 1950 г. внутри бетонной трубы смонтировали две трубы из нержавеющей стали: одну для сдувочных газов и другую для вентиляционных сбросов. Слив конденсата из трубы сбрасывали в р. Теча [13].

На второй стадии переработки происходило отделение урана и плутония от основной массы продуктов деления методом окислительно-ацетатного осаждения. Осадок, в котором находилась основная масса U и Pu, растворяли и передавали на следующую стадию переработки. Высокоактивный щелочной декантат, в котором помимо основной массы продуктов деления находилось около 10% плутония, направляли на длительное хранение в комплексы С [15].

На третьей стадии переработки плутоний отделяли от основной массы урана. Раствор плутония концентрировали, дополнительно очищали от остатков урана и продуктов деления и направляли на завод В для получения металлического плутония. Осадок уранилацетата растворяли в азотной кислоте, выдерживали 6 мес. в специальных емкостях (для распада ^{95}Zr и ^{95}Nb), затем подвергали марганцевой очистке и снова осаждали. Полученную соль уранила направляли для регенерации металлического урана. Отработанные растворы марганцевой пульпы сбрасывали в р. Теча [2, 7].

ЖРО различались по удельной активности и классифицировались в тот период по следующим категориям: высокоактивные (ВАО, свыше 1 Ки/л), низкоактивные (НАО, ниже 10^{-3} Ки/л) и среднеактивные отходы (САО), которые занимали промежуточную позицию. ВАО получались на начальных стадиях переработки, и для них было построено специально оборудованное хранилище (комплексы С) [15]. НАО, согласно проекту, должны были после адсорбционной очистки сливать в р. Теча [7]. В проекте планировалось, что все САО будут удаляться в закрытые водоемы (оз. Карачай, Старое болото) и не будут поступать в открытую гидрографическую сеть. Однако в реальности оказалось, что объемы САО значительно превышали величины, предусмотренные проектом. Во-первых, активность раствора марганцевой пульпы превышала проектные оценки [13, 15]. Во-вторых, конденсат, в большом количестве образующийся в вытяжной трубе, тоже относился к категории САО. В-третьих, не ожидалось значительного осаждения радиоактивных веществ на стенках технологических аппаратов, трубопроводов и каньонов. В процессе эксплуатации приходилось проводить периодические промывки оборудования, при которых получались так называемые “воды десорбции”, соответствующие категории САО [2].

Хранение и переработка ЖРО в 1949–1951 гг.

Хранилище ВАО было введено в эксплуатацию в начале 1949 г. Объем хранилища был рассчитан на прием 15 тыс. м³ радиоактивных отходов в год [16]. Хранилище состояло из отдельных железобетонных комплексов (так называемых комплексов “С”), заглубленных в грунт. Внутри каждого комплекса находились цилиндрические емкости из нержавеющей стали объемом 250 м³, установленные на дне железобетонных каньонов. Сверху каждый каньон был закрыт железобетонной плитой, а поверх всей конструкции была грунтовая насыпь. Для перекачки и выдачи ВАО использовали пневматические насосы.

Распад радионуклидов в период заполнения емкости сопровождался значительным выделением энергии. Перегрев ВАО мог привести к их закипанию и образованию взрывоопасного осадка, поэтому комплексы были обеспечены системами охлаждения (воздушной – в комплексе С-1, и водяной – в комплексах С-2, С-3 и С-4). Циркуляция воды осуществлялась в зазор между емкостью и стенками каньона. Охлаждающие линии были индивидуальными для каждой емкости, пуск воды по ним осуществлялся поочередно. Охлаждающие и дренажные воды сбрасывались в р. Теча через аварийный резервуар-коллектор (емкостью 1000 м³) и насосную станцию. По-

скольку по проекту радиоактивного загрязнения охлаждающих вод не предполагалось, радиационный контроль в коллекторе не был предусмотрен [7].

К концу 1949 г. большинство емкостей С-2 и С-3 были заполнены ВАО, которые перед этим не проходили специальной переработки. Свободными оставались 20 емкостей комплекса С-4 общим объемом 5000 м³. В декабре 1949 г. на заводе Б была введена в эксплуатацию установка по переработке ВАО. В основе технологии переработки был щелочной метод концентрирования стабильных примесей (железа, хрома, марганца) и адсорбированных на них урана, плутония и продуктов деления. Это приводило к уменьшению объема и повышению удельной активности ВАО в 30–40 раз [6]. Концентраты ВАО малыми порциями поступали на длительное хранение в специально выделенные емкости комплекса С-4, которые требовали усиленного охлаждения. Менее активные декантаты временно сливали в свободные емкости С-4 для дополнительной выдержки перед дальнейшей очисткой так называемым хроматно-карбонатным методом. В случаях длительной выдержки блоков в бассейнах завода А, когда значительная часть короткоживущих продуктов деления распалась до поступления на завод Б, декантаты напрямую поступали на очистку от стронция и хрома путем их осаждения с хроматом и карбонатом бария [5]. Этот процесс происходил в так называемой “хроматной яме”, которая представляла собой вырытый в земле резервуар глубиной 2 м и объемом 500 м³, стенки и дно которого были обшиты досками [5].

Первая хроматная яма была введена в эксплуатацию 1 мая 1950 г. и использовалась для фильтрации ЖРО через грунт и их отстаивания перед сбросом раствора в р. Теча. Первые 3–4 мес. яма работала в режиме фильтрации, когда весь раствор из ямы дренировался через грунт и в реку не поступал. Затем скорость фильтрации замедлилась, и избытки раствора из ямы стали сливать в р. Теча после отстоя и прохождения через адсорбер. Для полного осаждения хромата и карбоната бария время отстоя должно было составлять 1 мес. Согласно проекту, в р. Теча с раствором должны были попадать только Cs и Ru, а вклад Sr не должен был превышать 0.7% [6]. Однако, в связи с наращиванием производства и увеличением объема ЖРО, необходимый для полного осаждения срок перестали выдерживать, и в р. Теча начали поступать значительные количества стронция. В феврале 1951 г. первая хроматная яма полностью перестала фильтровать и переполнилась, поэтому весной 1951 г. была введена в эксплуатацию вторая хроматная яма, которая проработала в режиме фильтрации до 17 сентября 1951 г. [7]. После этого избытки раствора из хроматной ямы

Таблица 1. Периоды сбросов основных типов ЖРО радиохимического завода в р. Теча в 1949–1951 гг.

Наименование сбросного продукта	Периоды сброса в р. Теча		Комментарии
	начало	конец	
Низкоактивный декантат после выделения плутония	1 января 1949 г.	28 октября 1951 г.	До конца 1949 г. перед сбросом проходил адсорбционную очистку, с января 1950 г. сбрасывался в реку без очистки
Декантат из хроматной ямы	1 сентября* 1950 г. 17 сентября 1951 г.	30 апреля* 1951 г. 28 октября 1951 г.	С осени 1950 г. и до ввода в эксплуатацию второй хроматной ямы сбрасывался в реку после отстоя в первой хроматной яме. С 17.09.1951 г. снова сбрасывался в реку после отстоя в первой хроматной яме
Алюминатные воды (отходы после переработки растворов алюминиевых оболочек)	20 декабря 1950 г.	28 октября 1951 г.	До конца 1950 г. сливали в хроматную яму. С 20 декабря 1950 г. сбрасывали в реку
Раствор марганцевой пульпы после выделения урана	1 декабря* 1950 г.	28 октября 1951 г.	Начало сброса соответствует началу производства урана
Конденсат из большой трубы	1 сентября* 1950 г.	1 ноября* 1951 г.	Начало сброса соответствует завершению монтажа стальной трубы
Воды десорбции аппаратов и каньонов	1 сентября* 1950 г.	31 декабря 1951 г.	Этот тип ЖРО продолжал поступать в реку до середины 1952 г.
Аварийные протечки ВАО из комплекса С-4	1 мая* 1951 г.	1 декабря 1951 г.	Начало сбросов соответствует поступлению в дренажную систему комплекса С-4 большого количества воды весной 1951 г.

* Даты восстановлены по косвенным данным с погрешностью в 1 мес.

снова стали сливать в реку. Использование хроматных ям было прекращено в 1952 г., а сами ямы законсервированы.

В табл. 1 показаны календарные периоды сбросов основных типов ЖРО радиохимического завода в р. Теча. В табл. 1 помимо регулярных сбросов, описанных выше, включены аварийные протечки из хранилища ВАО, причины которых обсуждаются ниже.

Аварийные сбросы из хранилища ВАО

Емкости комплексов С были расположены ниже уровня грунтовых вод, а поскольку гидроизоляция каньонов быстро нарушилась, в каньоны помимо охлаждающей воды начала просачиваться грунтовая вода. Осенью 1950 г. для поддержания нормального уровня воды в каньонах комплексов С требовалась ее интенсивная откачка. Весной 1951 г. в результате обильного снеготаяния поступление воды в каньоны резко увеличилось. Повышение уровня воды в каньонах приводило к тому, что емкости, частично заполненные концентратами ВАО, всплывали. При всплытии

иногда повреждались линии приема-выдачи ВАО, деформировались стенки и днища емкостей, в сварных швах образовывались свищи. Как следствие часть каньонов вместо нерадиоактивной охлаждающей воды была заполнена смесью воды и ВАО [7].

Осенью 1951 г. было обнаружено значительное загрязнение охлаждающей воды в четырех каньонах комплекса С-4, в которых находились емкости с концентратами ВАО, причем в одном из каньонов активность воды достигала 30 ГБк/л, что свидетельствовало о серьезных повреждениях находившейся в этом каньоне емкости [7]. Поскольку охлаждающие воды сбрасывалась в р. Теча, периоды пуска воды в каньоны с поврежденными емкостями и последующей ее откачки совпадали по времени с залповыми (аварийными) поступлениями радиоактивности в воды реки [2, 7]. К этому времени на ПО «Маяк» уже работала система мониторинга сбросов ЖРО в р. Теча, зарегистрировавшая в октябре 1951 г. экстраординарный сброс [2, 9].

Система мониторинга сбросов в р. Теча

Система мониторинга сбросов на ПО “Маяк” включала: 1) постоянный контроль за радиоактивностью сточных вод в сливной трубе, выходящей из насосной станции на р. Теча; 2) периодические измерения удельной активности воды и донных отложений, пробы которых отбирали непосредственно у места сброса, в точке полного перемешивания ЖРО с речной водой (200 м ниже по течению) и в прудах-отстойниках (Кокшаровском и Метлинском), расположенных в 3–5 км от места сброса.

Первое обследование загрязнения воды и донных отложений было проведено летом 1950 г. на участке р. Теча длиной 5 км от места сброса [6]. Удельная активность оценивалась по γ -излучению проб. Результаты измерений воды показали, что “несмотря на то, что в промводы объекта Б подаются активные декантаты, абсолютное значение удельной активности в сбросных водах за счет разбавления оказалось практически равным нулю” [6]. Некоторое загрязнение донных отложений наблюдалось только в пределах 3 км от места сброса, а в пробах ила из Метлинского пруда (5 км от места сброса) радиоактивного загрязнения обнаружено не было [6]. Эти результаты свидетельствовали о том, что до конца лета 1950 г. в р. Теча не поступало большого количества радионуклидов.

Систематический мониторинг удельной активности речной воды в верховьях р. Теча был начат в июле 1951 г., а ежесуточный контроль суммарного сброса на сливной трубе – 25 сентября 1951 г. [7]. Результаты измерений речной воды в июле–августе 1951 г. показали, что удельная активность обычно составляла 0.1–0.3 МБк/л, но примерно дважды в месяц резко возрастала до 3–4 МБк/л, возвращаясь затем к “нормальным” уровням. Посуточный мониторинг на сливной трубе показал, что рутинные сбросы в начале осени 1951 г. колебались от 30 до 300 ТБк/сут, однако 27–29 сентября были зарегистрированы сбросы, превышающие 1000 ТБк/сут. Такие сбросы были оценены как “аварийные”, поскольку их источник не мог быть связан с нормальным технологическим процессом [7].

Суммарные месячные сбросы в р. Теча [9] и среднемесячные значения удельной активности речной воды в точке полного перемешивания [2] коррелировали между собой ($R = 0.997$), что позволило восстановить сбросы в июле–сентябре 1951 г. по измерениям активности воды (рис. 1). Как видно из рис. 1, суммарный сброс в октябре 1951 г. достиг максимального значения (48 ПБк/мес.). Этот аварийный сброс превышал все предшествующие, и для “смягчения” его последствий была проведена промывка прудов-отстойников водой из оз. Кзылташ [23]. С 17 по 22 октября из



Рис. 1. Данные мониторинга сбросов ЖРО в р. Теча [10] и среднемесячные значения активности речной воды в точке полного перемешивания [2] в 1951–1952 гг.

оз. Кзылташ было сброшено свыше 15 млн м³ воды, что позволило снизить концентрацию радионуклидов в воде и донных отложениях прудов, однако при этом в нижележащие участки р. Теча было вынесено большое количество радиоактивного ила.

С 28 октября 1951 г. сброс всех основных технологических отходов был переключен на оз. Карачай [2]. В коллекторе сточных вод с комплексов С был организован радиационный контроль, и в случае повышения уровня излучения сброс из коллектора тоже должен был переключаться на оз. Карачай. Эти меры привели к сокращению уровня сбросов и снижению активности воды в р. Теча (рис. 1).

РЕКОНСТРУКЦИЯ СБРОСОВ РАДИОНУКЛИДОВ В РЕКУ ТЕЧА

Описание технологии обращения с ЖРО на заводе Б совместно с данными по удельной активности и радиохимическому составу отдельных сбросных продуктов позволили восстановить величину и радионуклидный состав регулярных и аварийных сбросов в р. Теча [18]. Для этого предварительно была оценена надежность измерений, выполненных в начале 1950-х годов, путем модельной реконструкции измерительных методик (моделирование методом Монте–Карло переноса фотонов и электронов в условиях, имитирующих конфигурацию измеряемого образца, энергетический спектр источника, геометрию измерений, конструкцию детектора и материалы, из которых он был изготовлен) [24]. Результаты моделирования показали, что для большинства радионуклидов, присутствовавших в сбросах, измерительные методики 1949–1951 гг. давали оценку активности с погрешностью, не превышающей 30%.

Таблица 2. Радиохимический состав основных типов ЖРО, которые сбрасывали в р. Теча (по данным [10])

Сбросной продукт	Вклад группы радионуклидов, %				
	ЩЗЭ	Cs	Ru + Rh	PЗЭ	Zr + Nb
Декантат из хроматной ямы	23.2	21.6	49	3.6	2.2
Низкоактивный декантат после выделения плутония	5.7	5.7	80	1.6	7.4
Раствор марганцевой пульпы	0	0	2.5	0	97
Алюминатные воды	7.1	7.1	48	19	19
Конденсат из трубы	16.7	0.5	6.0	43.4	33.4
Воды десорбции	22.1	0.7	7.4	51.5	18.4

Примечание. ЩЗЭ – щелочноземельные элементы; PЗЭ – редкоземельные элементы.

Таблица 3. Удельная активность основных типов ЖРО и их суточный сброс в сентябре 1951 г. (по данным [7, 10])

Сбросной продукт	Удельная активность, ГБк/л	Суточный объем, м ³ /сут	Суточный сброс, ГБк/сут
Декантат из хроматной ямы	0.74	100	74.0
Низкоактивный декантат после выделения плутония	0.04	70	2.59
Раствор марганцевой пульпы	5.18	2.8	14.8
Алюминатные воды	0.09	20	1.85
Конденсат из трубы	2.59	20	51.8
Воды десорбции	1.85	5	9.25

Реконструкция регулярных сбросов

В табл. 2 представлен радиохимический состав различных типов ЖРО в регулярных сбросах [10, 17]. Радиохимические методы, имевшиеся на ПО “Маяк” в начале 1950-х годов [1], позволяли выделять из исходной смеси пять групп элементов: щелочноземельные элементы (ЩЗЭ), редкоземельные элементы (PЗЭ), группу рутения, цезий и цирконий с ниобием (табл. 2).

Значения удельной активности основных типов регулярных ЖРО и суточные значения сброса в сентябре 1951 г. (когда был начат контроль сбросов) представлены в табл. 3. Как следует из табл. 3, основной вклад в регулярный сброс ЖРО вносили декантат из хроматной ямы и конденсат из трубы. Оценки суммарной активности регулярных сбросов в сентябре, ноябре и декабре 1951 г., равные 154, 61 и 9.25 ГБк/сут (табл. 4), согласуются с данными мониторинга [7, 9], равными 152, 66 и 9.1 ГБк/сут соответственно.

В табл. 4 показаны оценки регулярных сбросов в р. Теча, восстановленные для различных календарных периодов, в соответствии с производительностью завода Б и хронологией сбросов различных типов ЖРО (табл. 1). Как видно из табл. 4, массивные сбросы в р. Теча начались в сентябре 1950 г. При этом максимальные активности

поступали в реку в периоды, когда происходили сбросы декантата из хроматной ямы. После 28 октября 1951 г. сбросы в реку значительно сократились, поскольку все технологические ЖРО начали удалять в оз. Карачай, а в р. Теча продолжали поступать низкоактивные воды из санпропускника, прачечной, лаборатории и т.п. [2]. Радионуклидный состав регулярных сбросов определялся теми видами ЖРО, которые доминировали в сбросах в данный период времени. Активности отдельных радионуклидов внутри радиохимических групп были оценены в соответствии с возрастом продуктов деления для каждого вида ЖРО. Также было учтено, что радионуклиды находились как в растворенном виде, так и были сорбированы на взвешенных частицах [2, 7]. В табл. 5 показаны суточные количества отдельных радионуклидов, поступавших в р. Теча в растворенном виде и на взвешенных частицах в периоды наибольших сбросов.

Реконструкция аварийных сбросов

С момента начала непрерывного мониторинга сбросных вод на трубе и до конца 1951 г. аварийные сбросы в р. Теча были зарегистрированы 27–29 сентября, 8–12 октября, 2 и 12 ноября (табл. 6). До начала мониторинга на трубе аварийные сбросы мо-

Таблица 4. Оценки регулярных сбросов ЖРО в р. Теча в различные периоды времени с января 1949 г. по декабрь 1951 г.

Начало периода	Конец периода	Суточный сброс, ТБк/сут
1 января 1949 г.	31 декабря 1949 г.	0.30
1 января 1950 г.	31 июля 1950 г.	2.78
1 августа 1950 г.	31 августа 1950 г.	1.96
1 сентября 1950 г.	30 ноября 1950 г.	123
1 декабря 1950 г.	31 декабря 1950 г.	138
1 января 1951 г.	30 апреля 1951 г.	139
1 мая 1951 г.	30 июня 1951 г.	66
1 июля 1951 г.	16 сентября 1951 г.	80
17 сентября 1951 г.	30 сентября 1951 г.	154
1 октября 1951 г.	28 октября 1951 г.	119
29 октября 1951 г.	30 ноября 1951 г.	61
1 декабря 1951 г.	31 декабря 1951 г.	9.25

Таблица 5. Суточные количества радионуклидов, поступающих в р. Теча в растворенном виде и на взвешенных частицах с регулярными и аварийными сбросами в периоды их максимальных значений

Нуклиды	Регулярные сбросы, ТБк/сут (17–30 сентября 1951 г.)			Аварийные сбросы, ТБк/сут (8–12 октября 1951 г.)		
	раствор	взвесь	всего	раствор	взвесь	всего
⁹⁰ Sr + ⁹⁰ Y	5.7	0.3	6.0	100	400	500
⁸⁹ Sr	27	2.5	30	30	110	150
¹³⁷ Cs	21	0	21	50	200	250
¹⁰³ Ru	34	4.0	38	10	40	50
¹⁰⁶ Ru + ¹⁰⁶ Rh	15	0.5	16	80	330	410
¹⁴⁴ Ce + ¹⁴⁴ Pr	0.3	12	12	1200	4600	5800
⁹⁵ Zr	5.2	7.2	12	100	380	480
⁹⁵ Nb	8.4	12	20	200	810	1010

Примечание. Вклад остальных ПД (⁹¹Y, ¹⁴⁰Ba, ¹⁴⁰La, ¹⁴¹Ce и др.) по сумме был менее 10%.

гут быть восстановлены только приблизительно по измерениям речной воды. Можно предположить, что аварийные сбросы периодически происходили с весны 1951 г., после повреждения емкостей с ВАО в результате поступления большого количества талой воды в дренажную систему комплекса С-4. Всего с аварийными сбросами в р. Теча по нашим оценкам поступило свыше 60 ПБк (табл. 6).

Радионуклидный состав аварийных сбросов примерно соответствовал теоретическому составу продуктов деления урана [17, 18]. Известно, что аварийный сброс 27–29 сентября 1951 г. произошел из емкости со “свежими” продуктами деления (возраст 90 сут), а экстраординарный сброс 8–12 октября 1951 г. произошел из емкости со “старыми” продуктами деления, возраст которых

превышал 1 год [17]. Радионуклидный состав этого сброса показан в табл. 5. Для оценки более ранних сбросов, когда даты заполнения емкостей, из которых происходила утечка ВАО, неизвестны, было предположено, что возраст продуктов деления в аварийных сбросах в среднем составлял 6 мес.

Сравнение старых и новых оценок сбросов

На рис. 2 представлена динамика суммарных (регулярных и аварийных) сбросов радиоактивных отходов в р. Теча с 1949 по 1956 гг. в сравнении с прежними оценками из работ [2, 4]. Как видно на рис. 2, удалось существенно уточнить динамику сбросов в 1949–1952 гг. Снизились оценки активности, сброшенной в 1949 и первой половине 1950 г. Начало массивных сбросов

Таблица 6. Оценки активности аварийных сбросов ЖРО в р. Теча, которые происходили с мая по ноябрь 1951 г.

Период 1951 года		Аварийный сброс, ПБк
начало	конец	
1 мая	31 августа	2.2 (ежемесячно)
15 сентября	16 сентября	2.0
27 сентября	29 сентября	6.4
8 октября	12 октября	44
2 ноября	12 ноября	1.3

переместилось с марта на сентябрь 1950 г. В явном виде удалось восстановить большие аварийные сбросы в сентябре и октябре 1951 г.

Во второй половине 1952 г. ситуация со сбросами стабилизировалась, к этому времени за загрязнением р. Теча был установлен двойной контроль: как со стороны ЦЗЛ ПО “Маяк”, так и со стороны ИБФ МЗ СССР [2, 4, 9, 25–28], и для этого периода оценки сбросов не изменились. Всего по нашим оценкам в р. Теча было сброшено около 115 ПБк радиоактивных веществ, что немного больше старых оценок, согласно которым суммарная активность сбросов составляла 102 ПБк [2, 3].

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ВОДЫ И ПОЙМЫ РЕКИ ТЕЧА В ПЕРИОД СБРОСОВ

В результате сбросов ЖРО вода, русло и пойма р. Теча были загрязнены смесью радионуклидов ($^{89,90}\text{Sr}$, ^{137}Cs , ^{95}Zr , ^{95}Nb , $^{141,144}\text{Ce}$, $^{103,106}\text{Ru}$, $^{90,91}\text{Y}$, ^{140}Ba). В 1949–1951 гг. уровни загрязнения всех компонентов речной системы нарастали, поскольку увеличивались сбросы ЖРО. Загрязне-

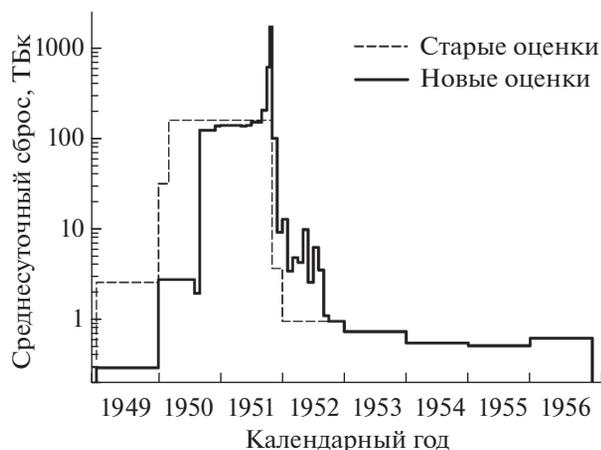


Рис. 2. Суммарные сбросы радиоактивных отходов ПО “Маяк” в р. Теча в 1949–1956 гг.: оценки из настоящей работы показаны в сравнении с оценками из работ [2, 4].

ние радионуклидами р. Теча в этот период было оценено с помощью специально разработанной модели речной системы, которая детально описана в [29]. Модель позволила на основании данных об активности радионуклидов, присутствовавших в сбросах, параметров водотока реки, характеристик ее русла и поймы рассчитать динамику концентраций радионуклидов в речной воде, донных отложениях и пойменных почвах на всем протяжении р. Теча от места сбросов до ее впадения в р. Исеть [29].

Модель включала в себя Кокшаров и Метлинский пруды, которые находились в 3–7 км от места сбросов и использовались для отстоя воды перед ее поступлением через плотину № 4 в нижележащие участки реки. В прудах происходили процессы радиоактивного распада, седиментации взвешенных частиц и сорбции радионуклидов донными отложениями и гидробионтами. На рис. 3 показано изменение удельной активности воды на выходе из Метлинского пруда. Как видно из рисунка, в конце 1950 г. активность воды увеличилась на два порядка величины, а затем сохранилась примерно на одном уровне до осени 1951 г. Модельные расчеты согласуются с результатами измерений активности воды, которые начались летом 1951 г. (рис. 3).

Удельная активность воды снижалась с расстоянием от места сбросов по течению реки за счет разбавления, седиментации взвешенных частиц и сорбции радионуклидов донными отложениями и биомассой (рис. 4). После прекращения массивованных сбросов в конце 1951 г. активность воды снизилась на два порядка, а затем процесс очищения воды замедлился (рис. 4). Это связано с тем, что дно реки стало местом депонирования большого количества радиоактивных веществ (рис. 5) и в дальнейшем мощным источником вторичного загрязнения речной воды за счет процесса десорбции радионуклидов. Как видно на рис. 4 и 5, модельные расчеты активности воды и донных отложений в 1951 г. согласуются с соответствующими результатами измерений на всем протяжении р. Теча.

Речная вода была основным источником питьевого водоснабжения жителей прибрежных НП, что

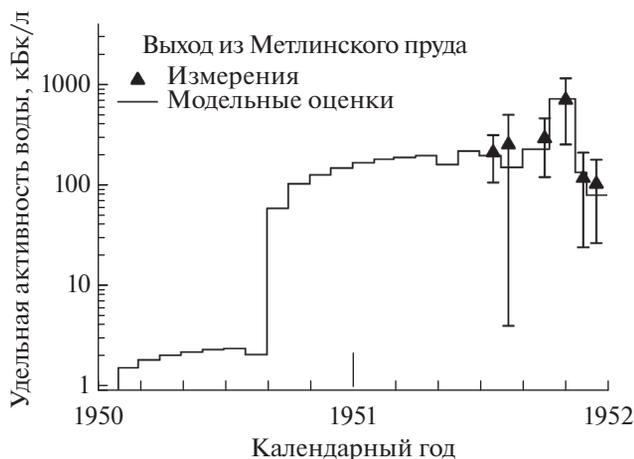


Рис. 3. Динамика удельной активности воды на выходе из Метлинского пруда (7 км от места сбросов) в 1950–1951 гг. (модельные расчеты и данные наблюдений [2, 8]).

обусловило поступление радионуклидов в организм. Уровни поступления ^{90}Sr в 1950–1956 гг. были восстановлены по данным более поздних измерений содержания этого радионуклида в зубах (1963–1971 гг.) и организме (1974–1996 гг.) у жителей НП Муслумово, расположенного в 78 км от места сбросов [30]. Как видно из табл. 7, значения концентрации ^{90}Sr в воде, рассчитанные по речной модели, согласуются с оценками, полученными ретроспективно из данных измерений ^{90}Sr в зубах и организме жителей Муслумово.

В результате экстраординарного паводка на р. Теча в апреле 1951 г. и промывок прудов были загрязнены пойменные почвы ниже плотины № 4. γ -Излучающие радионуклиды, загрязнившие пойму, стали основным источником внешнего облучения жителей прибрежных НП. До 1952 г. существенный вклад в загрязнение поймы вносили радионуклиды с относительно коротким периодом полураспада (^{95}Zr и ^{95}Nb), а затем загрязнение определялось долгоживущим ^{137}Cs (рис. 6). Поскольку вымывание ^{137}Cs из прирусловой части поймы происходило очень медленно (около 0.8% в год), начальная плотность загрязнения поймы (которая сформировалась к концу 1951 г.) была восстановлена по измерениям ^{137}Cs , которые выполнялись на пойме р. Теча в 1995–2005 гг. [31, 32]. На рис. 7 показаны модельные расчеты плотности загрязнения поймы ^{137}Cs в конце 1951 г. в сопоставлении с оценками, полученными ретроспективно на основе измерений. Как видно из рис. 7, значения, рассчитанные по речной модели, согласуются с оценками, полученными ретроспективно. Расчетные данные по загрязнению поймы были использованы для ре-

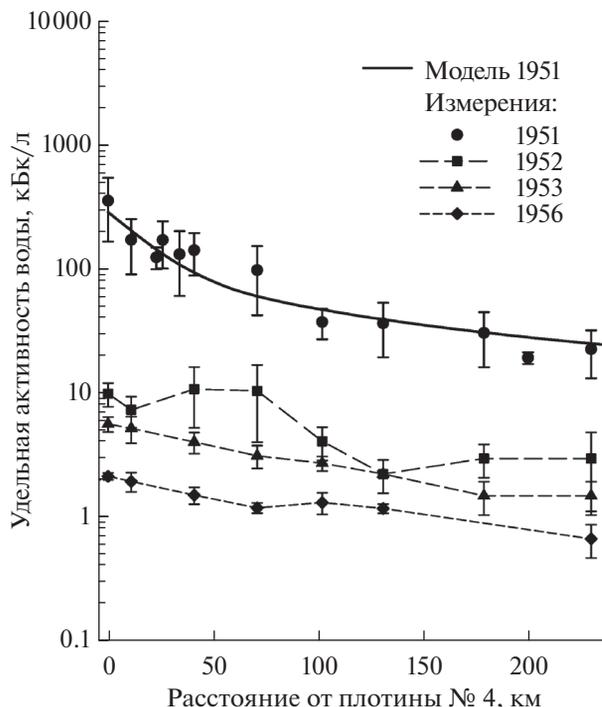


Рис. 4. Изменение удельной активности воды р. Теча с расстоянием от плотины № 4 в 1951–1956 гг. (модельные расчеты для 1951 г. и данные наблюдений [2, 8]).

конструкции поступления ^{137}Cs в организм жителей НП по р. Теча, которое происходило с речной водой и молоком коров, выпасаемых на пойменных лугах [33].

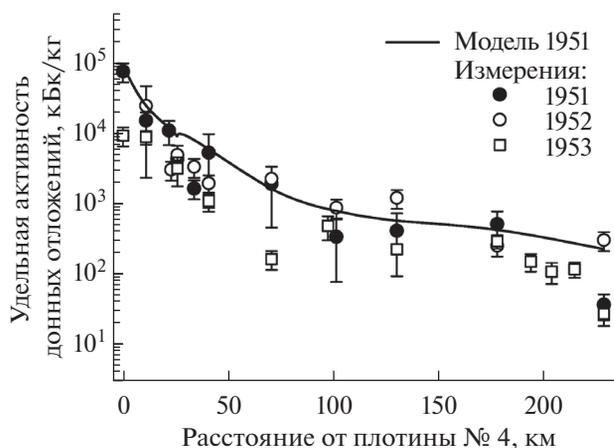


Рис. 5. Изменение удельной активности донных отложений р. Теча с расстоянием от плотины № 4 (модельные расчеты для 1951 г. и данные наблюдений [8, 25–27]).

Таблица 7. Сравнение концентраций ^{90}Sr в воде, рассчитанных по речной модели для расстояния 78 км от места сбросов и полученных из данных измерений ^{90}Sr в зубах и скелете у жителей НП Муслюмово

Календарный период	Концентрация ^{90}Sr в воде, кБк/л	
	расчет по модели реки Теча для расстояния 78 км	оценка по измерениям ^{90}Sr у жителей Муслюмово
Сентябрь 1950—февраль 1951 г.	4.6	4.6
Март—август 1951 г.	4.4	3.6

ВЫВОДЫ

1. Анализ архивных материалов, ставших доступными в последнее десятилетие, о технологии хранения и переработки жидких радиоактивных отходов в начальный период работы ПО “Маяк” позволил детально восстановить сбросы радионуклидов в р. Теча, которые осуществлялись в 1949–1956 гг., и привели к долговременному радиоактивному загрязнению речной системы Теча–Исеть–Тобол.

2. Концентрации радионуклидов в воде, донных отложениях и пойменных почвах р. Теча в 1949–1951 гг. были восстановлены с использованием специально разработанной модели речной системы. Модельные расчеты согласуются с данными измерений удельной активности воды и донных отложений, которые систематически проводились на р. Теча, начиная с лета 1951 г.

3. Концентрации ^{90}Sr в воде, рассчитанные по речной модели, согласуются с оценками, полученными ретроспективно из данных измерений ^{90}Sr в организме. Плотности загрязнения поймы ^{137}Cs , рассчитанные по речной модели, согласуются с оценками, полученными ретроспективно из данных измерений ^{137}Cs в пойменных почвах.

4. Результаты реконструкции загрязнения радионуклидами воды и поймы р. Теча используются в настоящее время для уточнения доз внешнего и внутреннего облучения и оценки риска отдаленных эффектов хронического радиационного воздействия на население.

Авторы выражают благодарности С.И. Ровному, Ю.Г. Мокрову и П.М. Стукалову (ПО “Маяк”) за предоставленную возможность работать с документами из архива ПО “Маяк” и полезные дискуссии.

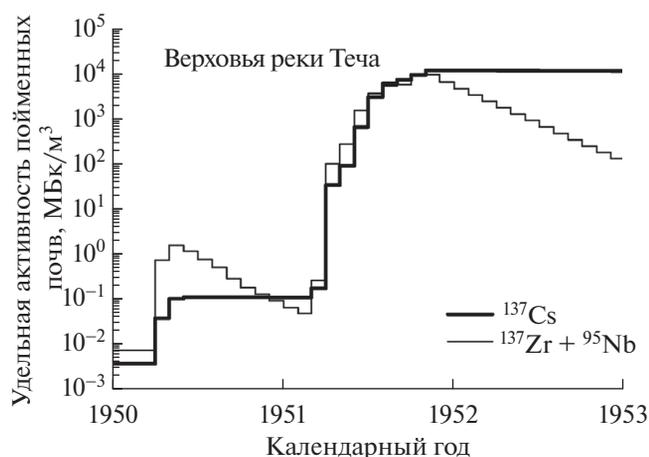


Рис. 6. Динамика загрязнения пойменных почв радионуклидами ^{137}Cs и $^{95}\text{Zr} + ^{95}\text{Nb}$ в верховьях р. Теча (30 км от места сбросов) в 1950–1952 гг. (модельные расчеты).

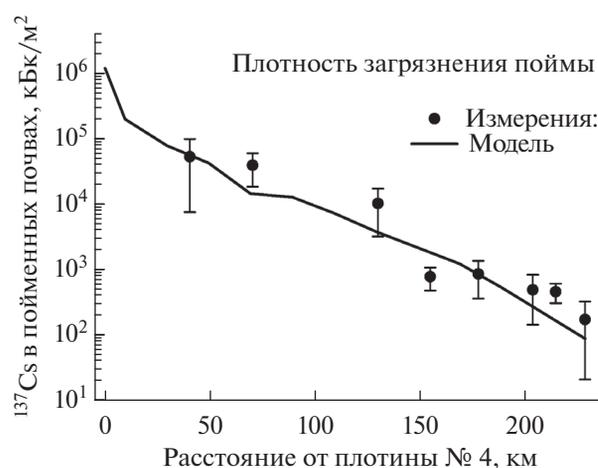


Рис. 7. Плотность загрязнения поймы ^{137}Cs с расстоянием от плотины № 4 в конце 1951 г.; результаты измерений [31, 32] приведены к 1951 г. путем поправки на радиоактивный распад и вымывание из прирусловой части поймы.

Работа была выполнена при финансовой поддержке ФМБА России и Департамента Энергетики США в рамках Российско-американского Соглашения по исследованию радиационных воздействий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ильин Д.И.* Миграция радиоактивных веществ из открытых водоемов: Дис. ... д-ра техн. наук. Гл. 2. 1956 г. // *Вопр. радиац. безопасности.* 2004. № 4. С. 46–59.
2. *Ильин Д.И.* Миграция радиоактивных веществ из открытых водоемов: Дис. ... д-ра техн. наук. Гл. 3 (3.1–3.3). 1956 г. // *Вопр. радиац. безопасности.* 2005. № 1. С. 60–77.
3. *Ильин Д.И.* Миграция радиоактивных веществ из открытых водоемов: Дис. ... д-ра техн. наук. Гл. 3 (3.3–3.7). 1956 г. // *Вопр. радиац. безопасности.* 2005. № 2. С. 50–75.
4. *Марей А.Н.* Санитарные последствия удаления в водоемы радиоактивных отходов предприятия атомной промышленности: Дис. ... д-ра мед. наук. М.: Ин-т биофизики МЗ СССР, 1959. 441 с.
5. *Перминов П.С., Зайцев Б.А., Альтшулер О.В. и др.* Очистка малоактивных щелочных растворов от токсичных радиоэлементов и шестивалентного хрома и сброс очищенных растворов. Озёрск: Архив ПО “Маяк”, 1950. 54 с.
6. *Ратнер А.П., Перминов П.С., Альтшулер О.В. и др.* О сбросе малоактивных растворов объекта “Б”. Озёрск: Архив ПО “Маяк”, 1950. 20 с.
7. Отчет комиссии ПГУ о загрязнении территории, прилегающей к заводу им. Менделеева, под председательством А.П. Александрова, 1951. // *Вопр. радиац. безопасности.* 2006. № 3. С. 60–74.
8. Отчет комиссии ПГУ о загрязнении территории, прилегающей к заводу им. Менделеева, под председательством А.П. Александрова, 1951. Гл. 2 // *Вопр. радиац. безопасности.* 2006. № 4. С. 60–69.
9. *Демьянович М.А., Пащенко А.Ф., Ермолаев М.И.* Отчет по изучению состава сбросных растворов объекта “Б”. Озёрск: Архив ПО “Маяк”, 1952. 45 с.
10. *Старик И.Е., Зильберман Я.И., Никольский Б.П., Ильин Н.В.* О мероприятиях по ликвидации сброса активных вод с завода “Б” и по снижению облучаемости на заводе. Озёрск: Архив ПО “Маяк”, 1952. 103 с.
11. Атомный проект СССР: Документы и материалы: в 3 т. Т. II: Атомная бомба 1945–1954. Кн. 4. / Под ред. Л.Д. Рябева. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ; М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 816 с.
12. Атомный проект СССР: Документы и материалы: в 3 т. Т. II. Атомная бомба 1945–1954. Кн. 5. / Под ред. Л.Д. Рябева. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ; М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 976 с.
13. *Гладышев М.В.* Плутоний для атомной бомбы. Озёрск: Изд-во ПО “Маяк”, 1992. 73 с.
14. *Брохович В.Б.* Химический комбинат “Маяк” История, серпантин событий. Озёрск: Изд-во ПО “Маяк”, 1996. 172 с.
15. *Сохина Л.П.* Страницы истории радиохимического завода ПО “Маяк”. Озёрск: Изд-во ПО “Маяк”, 2000. 156 с.
16. *Сохина Л.П.* Радиоактивные отходы: Проблемы и решения (страницы истории). Озёрск: Изд-во ПО “Маяк”, 2001. 138 с.
17. *Глаголенко Ю.В., Дрожко Е.Г., Мокров Ю.Г. и др.* Восстановление параметров источника сбросов жидких радиоактивных отходов радиохимического производства в р. Теча. Сообщение 1: Разработка методики и основные результаты // *Вопр. радиац. безопасности.* 2008. Спец. вып. 1. С. 76–91.
18. *Degteva M.O., Shagina N.B., Vorobiova M.I. et al.* Re-evaluation of waterborne releases of radioactive materials from the “Mayak” Production Association into the Techa River in 1949–1951 // *Health Phys.* 2012. V. 102. № 1. P. 25–38.
19. *Аклеев А.В., Крестинина Л.Ю., Престон Д. и др.* Радиационный риск злокачественных новообразований у жителей прибрежных сел реки Теча // *Мед. радиология и радиац. безопасность.* 2008. Т. 53. № 4. С. 13–37.
20. *Schonfeld S.J., Krestinina L.Y., Epifanova S.B. et al.* Solid cancer mortality in the Techa River Cohort (1950–2007) // *Radiat. Res.* 2013. V. 179. № 2. P. 183–189.
21. *Глаголенко Ю.В., Дрожко Е.Г., Мокров Ю.Г. и др.* Оценка эффективного времени хранения облученного урана в бассейне выдержки реактора “А” за период 1948–1954 гг. // *Вопр. радиац. безопасности.* 2006. № 3. С. 75–79.
22. *Гусев Н.Г., Рубцов П.М., Коваленко В.В., Колобашкин В.М.* Радиационные характеристики продуктов деления. М.: Атомиздат, 1974. 224 с.
23. *Ильин Д.И., Петрова А.И., Степанова Л.Г., Шаралапов В.И.* О загрязненности инертными продуктами территории ГХЗ им. Менделеева. Озёрск: Архив ПО “Маяк”, 1951. 24 с.
24. *Шишкина Е.А., Дегтева М.О.* Валидация измерений бета и гамма излучений, проводившихся на загрязненных территориях ПО “Маяк” в начале 50-х гг. прошлого века // *Актуальные вопросы радиационной гигиены.* СПб.: НИИРГ, 2010. С. 156–157.
25. *Ильин Д.И., Степанова Л.Г., Колубакин А.Ф. и др.* Об измерениях загрязненности инертными продуктами территории, прилегающей к ГХЗ им. Менделеева. Озёрск: Архив ПО “Маяк”, 1952. 38 с.
26. *Ильин Д.И., Колубакин А.Ф., Петрова А.И. и др.* Загрязненность водоемов, грунтовых вод, флоры и фауны активными продуктами, сбрасываемыми ГХЗ им. Менделеева. Озёрск: Архив ПО “Маяк”, 1953. 94 с.
27. *Марей А.Н., Ильин Д.И., Кардеева А.А. и др.* Влияние промышленных стоков завода им. Менделеева, сбрасываемых в р. Теча, на санитарные условия жизни и здоровье населения прибрежных пунктов. Озёрск: Архив ПО “Маяк”, 1952. 210 с.
28. *Марей А.Н., Ильин Д.И., Семиглазова Е.Д. и др.* Влияние промышленных сточных вод завода им. Менделеева, спускаемых в реку Теча и оз. Татыш, на санитарные условия жизни и здоровье жителей

- прибрежных населенных пунктов. Озёрск: Архив ПО “Маяк”, 1953. 125 с.
29. *Shagina N.B., Vorobiova M.I., Degteva M.O. et al.* Reconstruction of the contamination of the Techa River in 1949–1951 as a result of releases from the “Mayak” Production Association // *Radiat. Environ. Biophys.* 2012. V. 51. № 4. P. 349–366.
 30. *Tolstykh E.I., Degteva M.O., Peremyslova L.M. et al.* Reconstruction of long-lived radionuclide intakes for Techa riverside residents: Strontium-90 // *Health Phys.* 2011. V. 101. № 1. P. 28–47.
 31. *Костюченко В.А., Попова И.Я., Перемыслова Л.М., Мельников В.С.* Состояние радиоактивного загрязнения реки Теча // *Радиационная биология. Радиоэкология.* 2009. Т. 49. № 2. С. 212–218.
 32. *Трапезников А.В., Молчанова И.В., Караваева И.Н. и др.* Итоги многолетних радиоэкологических исследований реки Теча // *Вопр. радиац. безопасности.* 2007. № 3. С. 36–49.
 33. *Tolstykh E.I., Degteva M.O., Peremyslova L.M. et al.* Reconstruction of long-lived radionuclide intakes for Techa riverside residents: ^{137}Cs // *Health Phys.* 2013. V. 104. № 5. P. 481–498.

Contemporary Understanding of Radioactive Contamination of the Techa River in 1949–1956

M. O. Degteva*, N. B. Shagina, M. I. Vorobiova, E. A. Shishkina, E. I. Tolstykh, A. V. Akleyev

Urals Research Center for Radiation Medicine, Chelyabinsk, 454076 Russia

**e-mail: marina@urcrm.ru*

Analysis of recently available archive materials regarding the liquid radioactive waste storage and reprocessing at the “Mayak” Production Association in 1949–1956 has led to a more accurate reconstruction of radionuclide releases into the Techa River. Radionuclide concentrations in the Techa River water, bottom sediments and floodplain soils in 1949–1951 were reconstructed with the use of a purposely-developed Techa River model. Model calculations agree with the measurements of the specific activity in the river water and bottom sediments conducted since 1951. The model output for the ^{90}Sr concentration in the river water shows a good agreement with the retrospective estimates derived from ^{90}Sr measurements in teeth and the whole body of the Techa riverside residents. Modeled ^{137}Cs -contamination of the floodplain shows agreement with the values reconstructed from ^{137}Cs measurements in the floodplain soils obtained in later years. Reconstructed contamination levels by radionuclides in the Techa River water and floodplain are being used to refine internal and external doses and risk estimates of late effects in the population chronically exposed to radiation.