

УДК 621.039

© 2008

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКА СБРОСОВ ЖИДКИХ  
РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ РАДИОХИМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА  
В Р. ТЕЧА. СООБЩЕНИЕ 2. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РЕКОНСТРУКЦИИ  
И ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ПРОДОЛЖЕНИЮ РАБОТ**

*Ю.В. Глаголенко, Е.Г. Дрозко, Ю.Г. Мокров, С.И. Ровный,  
П.М. Стукалов, И.А. Иванов, А.И. Алексахин  
Россия, г. Озерск, ФГУП "ПО "Маяк"*

Приведен анализ полученных ранее результатов реконструкции параметров источника сбросов жидких радиоактивных отходов (ЖРО) в р. Теча за период с 1949 по 1951 гг. Анализ выполнен для двух основных долгоживущих (реперных) радионуклидов –  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ , которые до сих пор определяют радиоактивное загрязнение речной системы и обладают принципиально различными миграционными (сорбционными) свойствами. Анализируются данные об общем поступлении в р. Теча  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  с регламентными и аварийными сбросами ЖРО, полученные разными методами на основе обобщения большого объема накопленных экспериментальных данных радиационного, радиохимического, гидрологического и др. контроля с использованием выявленных ранее закономерностей переноса указанных радионуклидов в речной системе. Показано, что полученные результаты реконструкции не противоречат имеющимся экспериментальным данным. Сформулированы основные направления будущих исследований, необходимых для достижения конечной цели работы – оценки накопленных радиационных доз (и рисков) для населения прибрежных районов р. Теча.

Данная работа является второй частью единой публикации, посвященной восстановлению параметров источников сбросов ЖРО радиохимического производства ПО "Маяк" в речную систему р. Теча за период с 1949 по 1951 гг. В первой части работы (Сообщение 1) [1] приведено описание использованного нового методического подхода, и содержатся основные результаты выполненных расчетных исследований.

В данной работе выполнен анализ полученных ранее [1] результатов реконструкции и сформулированы основные направления будущих исследований.

**1. ОЦЕНКА АКТИВНОСТИ  $^{90}\text{Sr}$ ,  
ПОСТУПИВШЕГО В Р. ТЕЧА С  
РЕГЛАМЕНТНЫМИ И АВАРИЙНЫМИ  
СБРОСАМИ ЖРО**

Известно, что  $^{90}\text{Sr}$  занимает особое место среди всех радионуклидов, присутствовавших в составе сбрасываемых в р. Теча ЖРО, как радионуклид, обладающий максимальной миграционной способностью, большим периодом полураспада и высокой радиотоксичностью. Все вышесказанное предопределяет использование  $^{90}\text{Sr}$  в качестве своеобразного реперного радионуклида. Если каким-либо образом уда-

тся определить суммарное поступление  $^{90}\text{Sr}$  в речную систему и при этом будет известна доля этого радионуклида в составе регламентных и аварийных сбросов ЖРО, то эти данные позволят получить новую ценную информацию о параметрах источника сбросов ЖРО, поступивших в р. Теча.

Оценку общего поступления  $^{90}\text{Sr}$  в р. Теча в составе регламентных и аварийных ЖРО будем проводить тремя независимыми методами.

### 1.1. Метод баланса активности $^{90}\text{Sr}$ в речной системе

Приведенные ниже результаты исследований были получены в 1998 г. в рамках пилотной стадии проекта 1.3 JCCREER и в наиболее полном виде изложены в отчете [2] и в публикациях [3, 4].

Реконструкция радиоактивного стока  $^{90}\text{Sr}$  была выполнена методом баланса активности этого радионуклида в речной системе с использованием простейшей полуэмпирической миграционной модели. Указанный подход обладает рядом ограничений и предполагает наличие и использование результатов длительных непрерывных рядов гидрологических и радиационных (радиохимических) наблюдений в нескольких (не менее двух) фиксированных створах речной системы. Построение (оценка) баланса активности на изучаемом участке речной системы предполагает получение и анализ следующей информации:

- сток активности изучаемого радионуклида на входном и выходном створе участка реки;

- оценка общего запаса активности на исследуемом участке реки в некоторые фиксированные моменты времени;

- построение математической модели участка в виде системы рекуррентных (по времени) уравнений баланса активности (с учетом радиоактивного распада), содержащих набор полуэмпирических параметров, подлежащих определению;

- поиск значений вышеуказанных параметров, которые наилучшим образом описывают баланс активности для всего временного интервала, когда существовал контроль радиоактивного стока;

- построение с использованием найденных значений полуэмпирических параметров, баланса активности на заданном участке речной системы для периода времени, когда контроль радиоактивного стока не проводился.

Из всех радионуклидов, присутствовавших в составе сбрасываемых в р. Теча ЖРО, всем вышеуказанным требованиям удовлетворяет только один радионуклид –  $^{90}\text{Sr}$ .

При построении математической модели предполагалось, что  $^{90}\text{Sr}$  поступает со сбросами ЖРО в р. Теча только в ионной форме, а процессы сорбции/десорбции взаимнообратимы.

Основные результаты оценки поступления  $^{90}\text{Sr}$  со сбросами ЖРО в р. Теча приведены для створа плотины водоема В-4, створа среднего участка реки (с. Бродокалмак, с. Муслюмово) и для створа с. Першино (нижняя часть реки) в период с 1949 по 1995 гг. Полученные в работах [2–4] результаты не претендуют на высокую точность, но представляют особый интерес, поскольку в используемом методическом подходе не содержатся какие-либо предположения о радионуклидном составе сбрасываемых ЖРО и об изменении мощности источника сбросов во времени.

Результаты расчетов стока  $^{90}\text{Sr}$  на среднем и нижнем участках р. Теча (с. Муслюмово и с. Першино) приведены в табл. 1.

Общее количество  $^{90}\text{Sr}$ , поступившего в верховье р. Теча через гидротехнические сооружения (через плотину П-4) за период с 1949 по 1956 гг., было оценено [2–4]  $R = 40400$  Ки.

Таблица 1

Сток  $^{90}\text{Sr}$  в створе с. Муслюмово (Бродокалмак) и с. Першино [2–4]

Период времени	Сток $^{90}\text{Sr}$ , Ки	
	Муслюмово	Першино
1949–1951 гг.	16700	11900
1952–1980 гг.	8160	12400
1981–1995 гг.	770	810
Всего: 1949–1995 гг.	25630	25110



**1.2. Метод, основанный на анализе экспериментальных данных о содержании  $^{90}\text{Sr}$  в организме жителей с. Метлино**

Радиоактивный сток  $^{90}\text{Sr}$  с водами р. Теча является важной характеристикой источника радиоактивного загрязнения реки. Для заданного створа реки значение радиоактивного стока  $R$  за период времени  $T$  можно записать в виде:

$$R = \int_0^T C(t) \cdot Q(t) \cdot dt, \quad (1)$$

где  $C(t)$  – объемная активность речной воды в текущий момент времени  $t$ , Бк/л;

$Q(t)$  – скорость водного стока (расход воды) в момент времени  $t$ , л/с.

С учетом действующей на ПО “Маяк” помесечной периодичности проведения гидрологических и радиохимических измерений, уравнение (1) можно записать в виде суммы:

$$R = \sum_i^m C_i Q_i, \quad (2)$$

где  $C_i$  – среднее значение объемной активности воды реки за  $i$ -й месяц, Бк/л;

$Q_i$  – водный сток реки за  $i$ -й месяц, л.

Для жителей ряда населенных пунктов на р. Теча речная вода являлась основным (единственным) источником водопользования. Известно, что среднестатистический взрослый человек употребляет с пищей  $v = 1,6$  л/сут воды. Известно [5], что в период интенсивных сбросов ЖРО в р. Теча (1950–1951 гг.) основное поступление  $^{90}\text{Sr}$  в организм жителей происходило с речной водой, а поступление с молоком и другими продуктами питания не превышало 5%. Тогда поступление  $^{90}\text{Sr}$  в организм человека с речной водой можно записать:

$$P = v \cdot \Delta t \cdot \sum_{i=1}^m C_i, \quad (3)$$

где  $\Delta t \approx 30,4$  сут – среднее число дней в одном календарном месяце.

В соответствии с биокинетической моделью метаболизма [6] доля стронция, всасываемая из желудочно-кишечного тракта в кровь взрослого человека, принимается равной  $f_0 = 0,30$ . Доля стронция, поступающего из крови в кортикальную кость взрослого человека,  $f_c = 0,06$ , а в трабекулярную кость –  $f_t = 0,09$  [6].

Одновременно с поступлением и накоплением стронция в организме происходит процесс вывода радионуклида. Период полувыведения стронция из кортикальной кости взрослого человека равен 23,1 года ( $\lambda_c = 0,03$ , год $^{-1}$ ), а из трабекулярной кости – 3,9 года ( $\lambda_t = 0,18$ , год $^{-1}$ ) [6].

Если предположить, что основная часть активности  $^{90}\text{Sr}$  поступила в организм взрослых жителей с. Метлино в течении двух лет (1950–1951 гг.), то содержание (активность  $A$ ) этого радионуклида в скелете к концу 1951 г. можно представить в виде:

$$A = v \Delta t \cdot f_0 (f_c k_c + f_t k_t) \cdot \sum_i C_i \approx 1,9 \cdot \sum_i C_i, \quad (4)$$

$$k_c = \frac{1 - e^{-(\lambda + \lambda_c)T}}{(\lambda + \lambda_c)T} \approx 0,95,$$

$$k_t = \frac{1 - e^{-(\lambda + \lambda_t)T}}{(\lambda + \lambda_t)T} \approx 0,82,$$

где  $\lambda$  – постоянная распада  $^{90}\text{Sr}$  ( $\lambda = 0,024$ , год $^{-1}$ );

$k_c$  и  $k_t$  – поправочные коэффициенты, учитывающие, соответственно, убыль  $^{90}\text{Sr}$  из кортикальной и трабекулярной кости за счет процессов радиоактивного распада и биологического выведения стронция из кости за период времени  $T$  (1950–1951 гг.). Значения коэффициентов  $k_c$  и  $k_t$  (см. уравнение (4)) получены в предположении постоянной скорости поступления  $^{90}\text{Sr}$  в организм человека за период 1950–1951 гг.

Максимальное содержание  $^{90}\text{Sr}$  в скелете взрослых жителей с. Метлино по состоянию на начало 1952 г. было оценено специалистами УНШЦ РМ (по данным аутопсии и СИЧ) [5] и составляет  $A = 5,5 \cdot 10^5$  Бк.

Следует отметить, что ограничение на использование воды р. Теча для питьевых и хозяйственных нужд было введено для жителей с. Метлино в конце 1951 г. [5].

Данные о помесечном водном стоке р. Теча в створе с. Метлино [7] за период 1949–1951 гг. приведены в табл. 2.

Совместный анализ уравнений (1)–(4), данных табл. 2 и информации о максимальном содержании  $^{90}\text{Sr}$  в организме жителей с. Метлино позволяет получить максимальное,



Таблица 2  
Ежемесячный водный сток р. Теча в створе с. Метлино [7] (1950–1951 гг.)  
в млн. м<sup>3</sup>/мес

Месяц	с. Метлино	
	1950 г.	1951 г.
1	1,7	2,93
2	1,7	2,67
3	1,7	2,93
4	1,7	2,84
5	1,7	3,59
6	1,7	13,74
7	3,5	18,48
8	3,5	17,17
9	3,5	12,35
10	3,5	21,15
11	3,5	6,97
12	3,5	3,05
Всего	31,2	107,9

минимальное и “среднее” значение оценки радиоактивного стока стронция в указанном створе р. Теча за период 1950–1951 гг.:

$$\begin{aligned}
 R_{\max} &= Q_{\max} \sum_i C_i = \frac{Q_{\max} A}{v \cdot f_0 \Delta t (f_c k_c + f_i k_i)} = \\
 &= 6,09 \cdot 10^{15} \text{ Бк (165 кКи);} \\
 R_{\min} &= Q_{\min} \sum_i C_i = \frac{Q_{\min} A}{v \cdot f_0 \Delta t (f_c k_c + f_i k_i)} = \\
 &= 4,9 \cdot 10^{14} \text{ Бк (13,2 кКи);} \\
 \bar{R} &= \bar{Q} \cdot \sum_i C_i = \frac{\bar{Q} \cdot A}{v \cdot f_0 \Delta t (f_c k_c + f_i k_i)} = \\
 &= 16,7 \cdot 10^{14} \text{ Бк (45,1 кКи).}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Представленные выше максимальные и минимальные значения радиоактивного стока <sup>90</sup>Sr с водами р. Теча являются экстремальными оценками, которые определяют только возможные значения границ реального стока. Значение максимальной (минимальной) оценки радиоактивного стока  $R_{\max}$  ( $R_{\min}$ ) соответствует гипотетической ситуации, когда в течение всего

рассматриваемого периода времени водный сток реки соответствовал максимальному (минимальному) месячному значению. “Среднее” значение оценки радиоактивного стока получено в предположении, что водный сток р. Теча оставался постоянным в течении всего рассматриваемого промежутка времени и равным среднему значению ( $Q = \bar{Q} = \text{const}$ ).

Для получения более реалистичных оценок диапазона радиоактивного стока <sup>90</sup>Sr можно воспользоваться методом статистических испытаний (метод Монте-Карло – ММК).

Сущность предлагаемого подхода заключается в следующем:

- рассматривается множество различных сценариев ( $\sim 10^6$ ) изменения значений “среднемесячной” объемной активности воды  $\bar{C}_i$  в данном створе р. Теча за период 1950–1951 гг. ( $i = 1, 2, \dots, 24$ ). Значения  $\bar{C}_i$  определяются случайным образом из диапазона (0+1) методом ММК (в предположении постоянной плотности распределения  $\bar{C}_i$ );

- определяется значение нормировочного коэффициента:

$$x_c = \frac{A}{v \Delta t \cdot f_0 (f_c k_c + f_i k_i) \sum_i \bar{C}_i};$$

- рассчитывается значение радиоактивного стока <sup>90</sup>Sr для каждого сценария:

$$R = x_c \sum_i Q_i \bar{C}_i;$$

- рассчитывается частотное (вероятностное) распределение радиоактивного стока, и определяются параметры полученного распределения.

Результаты выполненных расчетов (рис. 1) показывают, что значение радиоактивного стока <sup>90</sup>Sr (1950–1951 гг.) в створе с. Метлино (удаленного от точки сброса ЖРО на ~7 км) находится в диапазоне от ~28 до ~65 кКи.

Строго говоря, вышеуказанный подход нельзя назвать полностью корректным, поскольку выбираемые значения  $\bar{C}_i$  не являются абсолютно случайными значениями (их сумма должна быть равна некоторой константе). Тем не менее, полученные расчетные оценки представляют особый интерес, поскольку имеют непосредственное отношение к дозиметрии внутреннего облучения населения.



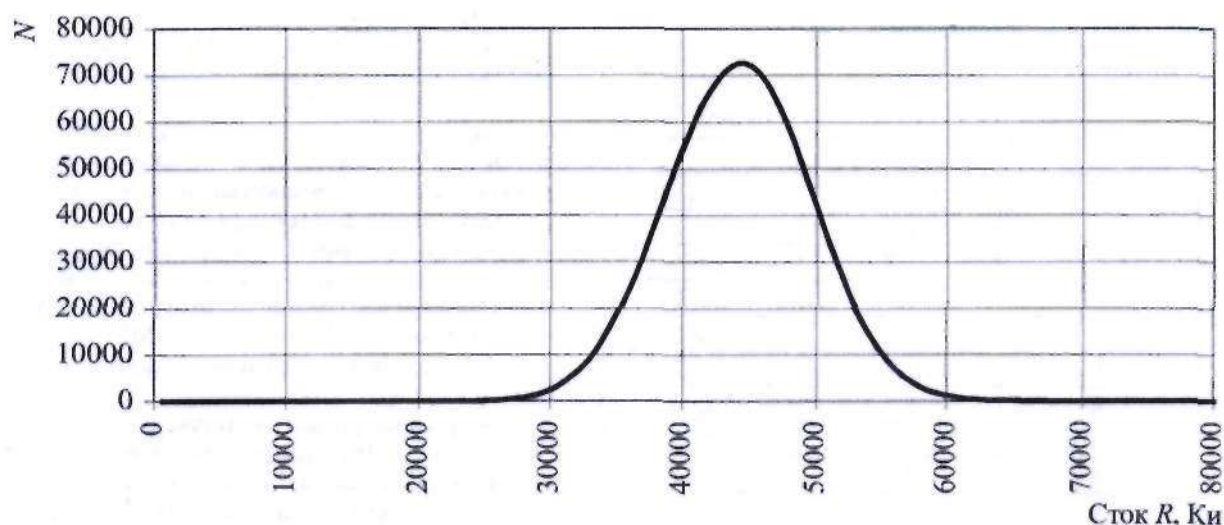


Рис. 1. Распределение вероятности (число сценариев –  $N$ ) радиоактивного стока  $^{90}\text{Sr}$  в створе с. Метлино ( $R$ ) за период 1950–1951 гг., расчет методом Монте-Карло (отн. ед.)

### 1.3. Метод имитационного моделирования

В работах [8–10] реконструкция параметров источника сброса ЖРО в р. Теча и радиоактивного стока всех рассматриваемых продуктов деления (включая  $^{90}\text{Sr}$ ) в створах с. Метлино и с. Муслимово была выполнена методом имитационного моделирования процессов переноса активности с водным потоком за период с 1949 по 1954 гг. Использование этого метода предполагает последовательное решение следующих основных задач:

- реконструкция радионуклидного состава ЖРО, сбрасываемых в р. Теча;
- реконструкция изменения во времени мощности сброса ЖРО;
- реконструкция (во времени) гидрологического режима водного стока по всей длине реки;
- изучение (оценка по известным литературным данным) сорбционных свойств всех радионуклидов, присутствовавших в ЖРО;
- выявление основных закономерностей миграции (переноса) радионуклидов с водным потоком в растворенной (ионной) форме и на взвешях (с твердым стоком);
- создание и верификация комплекса гидродинамических, полуэмпирических, аналитических и камерных сорбционных моделей для различных участков речной системы.

На основе разработанных математических моделей переноса радионуклидов с жидким и твердым радиоактивным стоком р. Теча создан взаимосвязанный пакет компьютерных программ “T-ALL”, включающий (рис. 2):

- полуэмпирическую модель “PM6P”;
- гидродинамические модели “TECHA-SED” и “TECHA-SED2”;
- камерную сорбционную модель “POND34”;
- одномерную сорбционную стационарную аналитическую модель “LINE”.

При проведении расчетных исследований учитывался перенос активности в растворенном виде (ионные формы) и на взвешях. При этом рассматривались как природные взвешенные вещества (ПВВ), так и труднорастворимые техногенные мелкодисперсные осадки (ТМОС), содержащиеся в составе сбрасываемых ЖРО.

При построении расчетной схемы использовались следующие основные предположения [8–10]:

- к радионуклидам с высокой сорбционной способностью относятся  $^{95}\text{Zr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{91}\text{Y}$ ,  $^{141}\text{Ce}$ ,  $^{144}\text{Ce}$ , основная часть которых переносится с водным потоком реки на взвешях (ПВВ и ТМОС);
- основным источником поступления ПВВ в воды р. Теча (в водоемы В-3 и В-4)

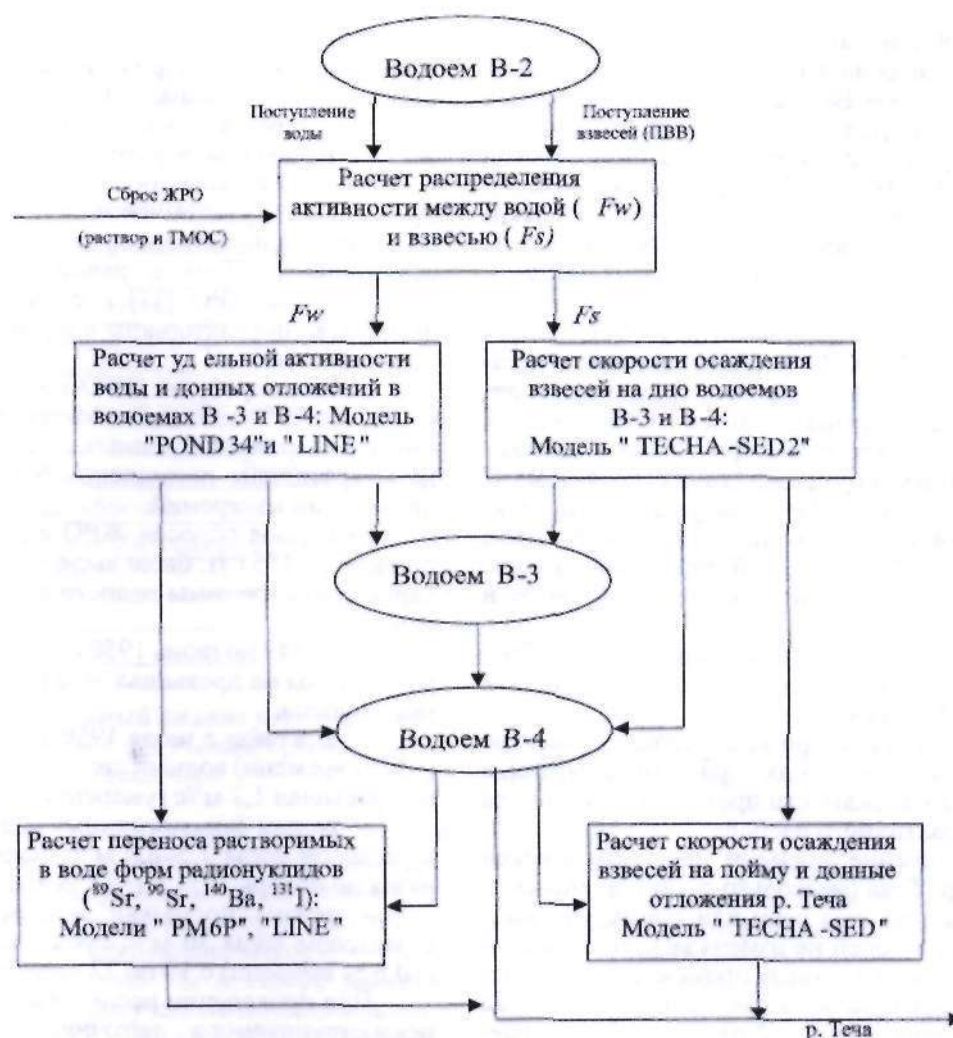


Рис. 2. Блок-схема проведения расчетов по реконструкции радиоактивного загрязнения р. Теча (комплекс "Т-ALL")

является сброс условно чистой воды из оз. Кызылташ через плотину П-2. "Чистые" (незагрязненные радионуклидами) взвешенные вещества (в основном глина) поступали через плотину П-2 в результате эксплуатации в 1949–1952 гг. рефулера, использовавшегося для добычи песка со дна водоема Кызылташ для нужд строительства;

– взвешенные вещества загрязнялись (в результате сорбции) радионуклидами в точке сброса ЖРО в р. Теча (~300 м ниже плотины П-2);

– загрязненные радионуклидами взвеси (ПВВ и ТМОС) переносились водным потоком, причем часть из них осаждалась в водоемах В-3 и В-4, а остальные поступали через плотину П-4 в открытую гидрографическую систему р. Теча. Расчет содержания радионуклидов в воде и донных отложениях водоемов В-3 и В-4 проводился с использованием двухкамерной сорбционной модели "POND34". При проведении этих расчетов учитывалось накопление радионуклидов в донных отложениях как



за счет сорбции, так и в результате оседания на дно взвешенных частиц. Доля взвесей, осаждавшихся в водоемах В-3 и В-4, рассчитывалась для различных гидрологических режимов водного стока с использованием гидродинамической модели "TECHNA-SED2", а осаждение взвесей по длине р. Теча (от плотины П-4 до устья реки) определялось на основе вариантных расчетов, выполненных по гидродинамической модели "TECHNA-SED";

- в составе регламентных ЖРО, сброшенных в р. Теча, 70 % общей активности находилось в виде техногенных труднорастворимых мелкодисперсных осадков солей (ТМОС), которые по гранулометрическому составу соответствовали градации "глина" (2-4 мкм). С осадками солей в р. Теча поступило: радионуклидов стронциевой группы - 25 %; рутениевой группы - 63 %; цирконий-ниобиевой группы - 62 %; редкоземельных элементов - 96 % и цезиевой группы - 5 % [20];

- при нерегламентных (аварийных) сбросах ЖРО практически вся активность содержалась на ТМОС [14];

- труднорастворимые осадки солей не участвовали в процессах сорбции-десорбции, а снижение их активности происходило только за счет радиоактивного распада;

- в течение времени переноса взвесей по длине р. Теча (несколько суток) до момента их оседания на дно реки или пойму удельная активность взвесей не изменялась, то есть считается, что в указанный промежуток времени радионуклиды необратимо сорбированы на взвешях, а радиоактивный распад за время переноса не учитывался;

- радионуклиды, осевшие на пойму реки, фиксируются на поверхности, заглубляются в почву и во вторичных процессах переноса с водным потоком не участвуют;

- радионуклиды, осевшие на русловую часть реки, накапливаются на поверхности донных отложений и могут принимать участие в обменных процессах (эрозия, десорбция).

Значение временного шага для проведения расчетов было принято равным одному календарному месяцу. Все исходные данные были усреднены по каждому календарному месяцу. Среднемесячные расходы воды в истоке (створ плотины П-4) и в устье р. Теча (створ

с. Першинское) были получены на основе результатов прямых гидрологических измерений, выполненных специалистами ПО "Маяк" и Госкомгидромета СССР. Мощность сброса ЖРО в р. Теча за период с января 1949 г. по декабрь 1951 г. была оценена на основе данных Д.И. Ильина с учетом имеющейся информации об уровне радиоактивного загрязнения донных отложений р. Теча в районе расположения точки сброса ЖРО [11] и с учетом режимов эксплуатации реакторного и радиохимического производства.

Мощность сброса ЖРО в р. Теча за период с 1952 по 1954 гг. задавалась на основе сохранившихся архивных данных с учетом поправки на коэффициент поглощения бета-частиц при проведении измерений.

За период сбросов ЖРО в р. Теча с 1949 по октябрь 1951 гг. были выделены следующие характерные режимы водного стока через плотину П-4:

- с 1949 по июнь 1950 гг. (~51 % времени) расход воды не превышал ~0,6 м<sup>3</sup>/с (ограниченные сбросы);

- в период с июля 1950 г. по май 1951 г. (~34 % времени) водный сток через плотину П-4 не превышал 1,2 м<sup>3</sup>/с (умеренные сбросы);

- режим форсированных водных сбросов с расходом воды 7,5-8,0 м<sup>3</sup>/с осуществлялся с июня по ноябрь 1951 г. (~14 % времени);

- режим "промывки" водоемов В-3 и В-4 с расходом воды 30 м<sup>3</sup>/с продолжался 6 суток (~0,6 % времени) с 17 по 22 октября 1951 г.

При проведении исследований параметры реконструируемого источника поступления ЖРО в р. Теча корректировались и уточнялись на основе сопоставления расчетных результатов имитационного моделирования и следующих архивных экспериментальных данных радиоэкологического контроля:

- данных об удельной активности воды р. Теча;

- данных об удельной активности и радиохимическом составе загрязненных донных отложений верхнего участка р. Теча в различные периоды времени [11];

- данных о радиационной обстановке в прибрежных районах р. Теча [12];

- данных о содержании стронция-90 в скелете жителей с. Муслумово [13].



Таблица 3

Интегральные (за период с 1949 по 1951 гг.) оценки сброса  $^{90}\text{Sr}$  с ЖРО и стока  $^{90}\text{Sr}$  в различных створах р. Теча, полученные различными методами

в кКи

Метод оценки	Сброс с ЖРО	Сток		
		плотина П-4 (с. Метлино)	с. Муслимово (Бродокалмак)	с. Першино
Реконструкция источника стока				
Метод баланса активности [2–4]	–	40,4	16,7	11,9
Содержание $^{90}\text{Sr}$ в организме жителей с. Метлино (данная работа)	–	45,1 (28–65)	–	–
Метод имитационного моделирования [8–10]	23,6	22,2	12,3	–
Реконструкция источника сброса [1]:				
1. Регламентные сбросы:	8,3	–	–	–
2. Нерегламентные сбросы (включая):				
– сентябрь 1951 г.	1,6	–	–	–
– октябрь 1951 г.	57,0	–	–	–
Всего	66,9	–	–	–

#### 1.4. Сравнительный анализ результатов реконструкции, полученных разными методами

Основные результаты реконструкции сброса  $^{90}\text{Sr}$  в речную систему и стока  $^{90}\text{Sr}$  в различных створах р. Теча приведены в табл. 3.

Анализ результатов реконструкции (табл. 3) позволяет сделать следующие выводы:

– значение стока  $^{90}\text{Sr}$  в створе плотины П-4 (с. Метлино), полученное методом баланса активности (МБА) – 40,4 кКи, хорошо (в пределах 12 %) совпадает с соответствующим результатом, полученным методом определения содержания  $^{90}\text{Sr}$  в организме жителей (МОСОЖ) – 45,1 кКи, но в то же время почти в два раза больше, чем аналогичный результат, полученный с использованием метода имитационного моделирования (МИМ) – 22,2 кКи;

– значение стока  $^{90}\text{Sr}$  в створе с. Муслимово, полученное методом МБА (16,8 кКи), удовлетворительно (в пределах 30 %) совпадает с аналогичным результатом, полученным методом МИМ – 12,3 кКи;

– реконструированное значение интегрального поступления  $^{90}\text{Sr}$  в р. Теча (в точке

сброса ЖРО) – 66,9 кКи оказалось в три раза больше, чем соответствующая оценка, полученная методом МИМ – 23,6 кКи и почти в пять раз меньше, чем известная оценка Д.И. Ильина – 320 кКи [14].

Указанные “расхождения” результатов могут быть объяснены теми исходными предположениями, которые использовались в каждом из рассмотренных методов оценки. Так, например, в методе МБА не учитывалось, что значительная часть активности  $^{90}\text{Sr}$  (до ~25 %) в сбросах ЖРО содержалась на ТМОС. При использовании метода МИМ не учитывался аварийный сброс ЖРО в октябре 1951 г., поскольку информация об этом сбросе была обнаружена в архивах ПО “Маяк” только в 2006 г., в период выполнения работ по проекту МНТЦ № 2841. Следует отметить, что радиационные последствия этого сброса для загрязнения речной системы и дозового воздействия на населения требуют отдельного тщательного рассмотрения, поскольку в период сброса и непосредственно после его окончания была проведена “промывка” водоемов В-3, В-4 и всей речной системы относительно чистой водой из оз. Кызылташ с расходом воды ~30 м<sup>3</sup>/с (с 17 по 22 октября



1951 г.). Изучение радиологических последствий такой "промывки" может быть выполнено только методами математического моделирования. Следует отметить, что специалисты УНПЦ РМ не выявили изменения скорости поступления  $^{90}\text{Sr}$  в организм (и зубах) жителей р. Теча после октября 1951 г. [5].

## 2. ОЦЕНКА АКТИВНОСТИ $^{137}\text{Cs}$ , ПОСТУПИВШЕГО В р. ТЕЧА С РЕГЛАМЕНТНЫМИ И АВАРИЙНЫМИ СБРОСАМИ ЖРО

### 2.1. Основные источники поступления взвешенных частиц в речную систему

Известно, что перенос загрязнителей (радиоактивности) с речными водами может происходить как в жидкой фазе (в растворенном виде), так и с твердым стоком (на взвесах). Перенос радионуклидов, находящихся в разных агрегатных состояниях (жидкое – твердое), описывается различными физико-химическими процессами. Для растворенных в воде форм радионуклидов основными факторами, определяющими перенос активности, является объем водного стока и сорбционные (десорбционные) свойства пород, слагающих русло реки. Для радионуклидов, сорбированных на взвешенных веществах, перенос активности (твердый радиоактивный сток) определяется гранулометрическим составом взвесей и гидродинамическими параметрами водного потока (скорость течения, турбулентность), которые, в свою очередь, зависят от уклона русла реки, строения (формы) речной долины, шероховатости дна, степени зарастания русловых и прибрежных участков реки водной растительностью и др. Для разных радионуклидов при различных гидрологических режимах течения соотношение между стоком активности в жидкой и твердой форме может существенно изменяться.

При анализе переноса радионуклидов с твердым стоком в речных системах основное внимание следует уделять мелкодисперсным фракциям (глина и очень мелкий ил) по следующим причинам. Во-первых, мелкодисперсные взвеси обладают наименьшей скоростью осаждения (гидравлическая крупность  $\sim 1,5 \cdot 10^{-5}$  м/с [15]) и, следовательно, могут переноситься с

речным потоком на большие расстояния. Во-вторых, мелкодисперсные фракции донных отложений легко подвергаются взмучиванию (эрозии) даже при небольших скоростях водного потока. Кроме того, результаты многочисленных экспериментальных исследований показывают, что основная часть активности твердого стока содержится именно на мелкодисперсных фракциях взвесей. Так, в работах [16, 17] было показано, что 98 %  $^{137}\text{Cs}$ , содержащегося на взвесах в водах р. Теча, переносится на глинистых частицах размером менее 5 мкм. Анализируя распределение активности плутония и  $^{137}\text{Cs}$  по различным фракциям пойменных почв р. Теча, авторы работы [18] показали, что максимальная относительная удельная активность (до 50 %) сосредоточена на частицах с размером менее 5 мкм. На долю крупнодисперсных частиц (с размером более 20–50 мкм) приходится не более 8 % активности, несмотря на то, что вклад этих частиц в суммарную массу пойменных почв превышает 50 %. Поэтому при анализе полученных расчетных результатов основное внимание следует уделять самым мелкодисперсным фракциям – глине (размер частиц 2–4 мкм) и очень мелкому илу (4–8 мкм).

В 1950–1951 гг. в верховье р. Теча, помимо естественных (природных) источников, существовало, по крайней мере, еще два мощных техногенных источника поступления взвешенных веществ в воды реки.

Во-первых, в воды р. Теча поступали естественные (природные) взвеси в виде частиц глины, ила, концентрация которых в воде водоема В-2 в районе плотины П-2 достигала 200–300 мг/л в результате эксплуатации рефулера [14]. Рефулер использовался для добычи песка для нужд строительства. Добыча песка осуществлялась методом гидронамыва из карьера, расположенного на берегу водоема В-2 в 300–500 м южнее плотины П-2. Известно, что вода в водоеме В-2, в результате эксплуатации систем оборотного водоснабжения предприятия, циркулировала по направлению, противоположному ходу часовой стрелки (вид сверху). Потоки циркулирующей в водоеме В-2 воды подхватывали сбросы рефулера и доставляли взвешенные вещества в район плотины П-2, откуда взвеси (в основном в виде частиц глины) поступали в воды р. Теча и далее в водоемы В-3 и В-4 (рис. 3).



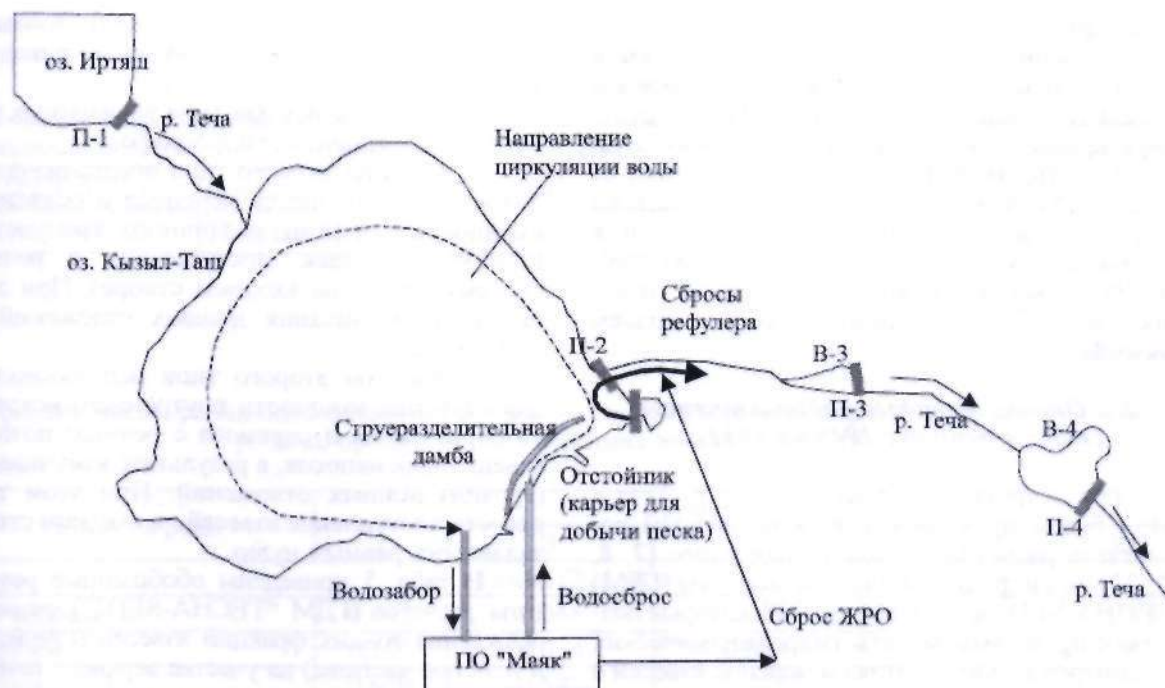


Рис. 3. Особенности циркуляции воды в водоеме В-2 (поступление взвесей в р. Теча)

При обследовании плотины П-2 в августе 1952 г. комиссия, возглавляемая А.Н. Мареем отмечала [19]: «В результате длительного поступления в озеро (водоем В-2) стоков с рефулера, содержащих взвесь глины, вода в нижней части водоема имеет «белесоватый» оттенок, а на дне перед плотинной образовались отложения мелких фракций песка». (Для справки: рефулер – плавучий трубопровод, служащий для транспортировки смеси грунта с водой от землесосного или землечерпательного снаряда к месту свалки – Большая Советская Энциклопедия, второе изд., т. 36). К сожалению, точные сроки начала эксплуатации рефулера неизвестны. Карьер по добыче песка был закрыт в конце 1952 г., и, начиная с 1953 г., мощность рассматриваемого источника поступления взвесей в верховье речной системы становится пренебрежимо малой. Так, содержание взвешенных веществ в воде водоемов В-3 и В-4 в 1954 г. было равно [14] – 5,5 и 16,7 мг/л, а в 1955 г. – 18,6 и 20,5 мг/л, соответственно. До 1953 г. значительная часть радионуклидов сорби-

ровалась взвешенными частицами, которые частично осаждались на дно прудов В-3 и В-4, где скорость течения воды резко уменьшалась, а частично (в основном мелкие фракции) поступали с водным потоком через плотину П-4 в р. Теча. Часть загрязненных радионуклидами взвешенных веществ, осевших на дно водоемов В-3 и В-4, при взмучивании (в результате интенсивной ветровой нагрузки или при изменении гидрологического режима течения) могли снова вовлекаться в водный поток и через плотину водоема В-4 поступать в р. Теча.

Вторым техногенным источником поступления взвешенных веществ в р. Теча являлись нерастворимые в воде осадки солей, содержащиеся в сбросных водах. Сточные воды, направляемые на сброс в р. Теча, представляли собой (в 1951 г.) растворы нитрата и ацетата натрия (до 3–5 г/л), содержащие мелкие взвешенные частицы (мути), которые не отстаивались полностью даже при выдержке в течение суток. После длительного (несколько суток) отстаивания объем осадка составлял от нескольких



сотых до нескольких десятых долей процента по отношению к исходному объему. Осадок в значительной степени состоял из гидроокиси железа и органических веществ. Путем центрифугирования отобранных проб было установлено, что активность осадка составляла от 40 до 90 % от активности исходного раствора [20]. Этот источник поступления взвесей в р. Теча прекратил свое существование 28 октября 1951 г., когда основная часть технологических отходов была направлена на сброс в водоем Карачай.

### 2.2. Оценка твердого радиоактивного стока в период с 1949 по 1951 гг.

Реконструкцию сбросов  $^{137}\text{Cs}$  в р. Теча с ЖРО будем проводить с использованием результатов расчетов, выполненных ранее [7, 8, 21, 22] по гидродинамическим моделям (ГДМ) "TECHA-SED" и "TECHA-SED2", которые позволяют проводить расчеты гидродинамических параметров водного потока и перенос взвесей в открытых поверхностных водотоках.

Основные входные параметры ГДМ:

- продольная и поперечная геометрия речной долины, поймы и русла;
- гидрограф (распределение водного стока по длине реки и во времени);
- гранулометрический состав взвесей и донных отложений;
- шероховатость русла и поймы;
- температура воды.

Основные результаты расчетов (для любого створа реки):

- уровень водной поверхности (ширина реки, площадь затопления);
- интенсивность взмучивания (эрозии) донных отложений;
- содержание взвесей в воде (твердый сток, скорость осаждения, поверхностная плотность осаждения взвесей).

ГДМ р. Теча по состоянию на начало 1950-х гг. созданы на основе программы HEC-6 (Hydrologic Engineering Center, U.S. Army Corps of Engineers, 1993). При этом использовались результаты гидрологических наблюдений (1948–1956 гг.), материалы гидрографического обследования р. Теча (1948, 1949), картографические материалы речной долины (1949–

1957 гг.) масштабов 1:2000 – 1:10000. Основные характеристики созданных моделей приведены в табл. 4.

Использовались два типа вариантных расчетов (для различных гидрографов):

1. Расчеты первого типа предназначались для изучения процесса переноса и осаждения взвешенных частиц различного гранулометрического состава, поступающих в речную систему извне (на входном створе). При этом процесс взмучивания донных отложений не учитывался.

2. Расчеты второго типа использовались для изучения мощности внутреннего источника образования и переноса с речным потоком взвешенных наносов, в результате взмучивания (эрозии) донных отложений. При этом типе расчета поступление взвесей на входном створе задавалось равным нулю.

В табл. 5 приведены обобщенные результаты расчетов (ГДМ "TECHA-SED2") скорости осаждения тонких фракций взвесей (глинистые и илистые частицы) на участке верхнего течения р. Теча при различных гидрологических режимах водного стока (первый тип расчета) [8, 22].

Результаты расчетов (ГДМ "TECHA-SED") распределения твердого стока взвешенных частиц различного гранулометрического состава по длине р. Теча для различных гидрологических режимов представлены в табл. 6 [7, 21].

Независимую оценку поступления  $^{137}\text{Cs}$  в речную систему р. Теча выполним при следующих предположениях:

1. Основная часть активности  $^{137}\text{Cs}$  (более 60 %) поступила в воды р. Теча в период "промывки" водоемов В-3 и В-4 в первых двух декадах октября 1951 г. [1].

2. В этот период времени основная часть активности  $^{137}\text{Cs}$  переносилась с водами реки на взвесах техногенного и природного происхождения, соответствующих по гранулометрическому составу грации "глина" (2–4 мкм). Под воздействием потока воды, поступающей из водоема В-2 с расходом ~30 м<sup>3</sup>/с, происходило дополнительное интенсивное взмучивание накопленных на дне водоемов В-3 и В-4 донных отложений и сорбция ионных форм  $^{137}\text{Cs}$  на взвесах, главным образом, на частицах глины, обладающих максимальной сорбционной способностью.



Таблица 4

Основные характеристики разработанных гидродинамических моделей

Название модели	Участок реки	Длина участка реки, км	Число расчетных створов
ТЕСНА-SED	Плотина П-4 – устье р. Теча	223,1	244
ТЕСНА-SED2	Плотина П-2 – плотина П-4	7,2	52

Таблица 5

Баланс массы различных фракций взвешенных частиц, осаждающихся на верхнем участке р. Теча, при различных режимах водного стока [8, 22]

в отн. ед.

Участок реки	Расход воды, м <sup>3</sup> /с				
	1	3	5	8	30*
Глина (2–4 мкм)					
До водоема В-3	0,092	0,068	0,042	0,018	0,008
Водоем В-3	0,100	0,074	0,063	0,045	0,037
Водоем В-4	0,669	0,582	0,487	0,344	0,204
Выход через П-4	0,139	0,276	0,408	0,593	0,751
Очень мелкий ил (4–8 мкм)					
До водоема В-3	0,323	0,240	0,163	0,071	0,029
Водоем В-3	0,250	0,213	0,194	0,157	0,138
Водоем В-4	0,427	0,541	0,614	0,647	0,511
Выход через П-4	–	0,006	0,029	0,125	0,322
Мелкий ил (8–16 мкм)					
До водоема В-3	0,789	0,663	0,505	0,254	0,112
Водоем В-3	0,178	0,245	0,323	0,390	0,403
Водоем В-4	0,033	0,092	0,172	0,356	0,473
Выход через П-4	–	–	–	–	0,012
Средний ил (16–32 мкм)					
До водоема В-3	0,998	0,987	0,937	0,685	0,375
Водоем В-3	0,002	0,013	0,062	0,298	0,567
Водоем В-4	–	–	0,001	0,017	0,058
Выход через П-4	–	–	–	–	–
Крупный ил (32–62,5 мкм)					
До водоема В-3	1,0	1,0	1,0	0,987	0,830
Водоем В-3	–	–	–	0,013	0,170
Водоем В-4	–	–	–	–	–
Выход через П-4	–	–	–	–	–

Примечание. \* Вода из водоемов В-3 и В-4 спущена, плотины П-3 и П-4 открыты (режим промывки).



ДОЗИМЕТРИЯ НАСЕЛЕНИЯ ЮЖНОГО УРАЛА

3. Частицы глины, загрязненные  $^{137}\text{Cs}$  (и другими радионуклидами), переносились с водным потоком по длине реки и осаждались на поверхности донных отложений реки и ее пойменных (затопляемых) землях. Осевшие на поверхность затопленной части поймы взвеси прочно фиксировались почвой и прибрежной растительностью. В последующий период времени (1952–2000 гг.) пространственное распределение радиоактивного загрязнения поймы на верхнем участке реки не претерпело существенных изменений, а общий запас депонированной активности уменьшался только за счет процесса радиоактивного распада.

4. Суммарный запас  $^{137}\text{Cs}$ , депонированного на верхнем участке р. Теча (от створа плотины П-11 до створа с. Мусломово), по состоянию на 1991 г. принят равным 5700 Ки [5], как среднее значение, определенное двумя независимыми организациями – ПО “Маяк” и

ФИБ-4 (УНЩРМ), что в пересчете на 1951 г. (с учетом радиоактивного распада) соответствует ~15700 Ки. Это значение было использовано для абсолютной нормировки относительных расчетных распределений плотности осажде-ния мелкодисперсных взвесей по длине реки.

5. Относительные распределения массы осевших мелкодисперсных частиц (градация “глина”) на различных участках р. Теча (в долях от суммарного поступления на входном створе) были получены ранее с использованием ГДМ “TECHN-SED2” (табл. 5) [8, 22] и ГДМ “TECHN-SED” (табл. 6) [7, 21] для гидрологических режимов водного стока, соответствующих режиму “промывки” (17–22 октября 1951 г.).

6. В работах [7, 21] было показано, что режим “промывки” водоемов в октябре 1951 г., с точки зрения формирования водного стока р. Теча, а, следовательно, и относительного распределения твердого стока, в среднем и нижнем

Таблица 6

Расчетные распределения массы осевших взвешенных частиц по длине р. Теча для различных фракций и режимов водного стока, в процентах от поступления через плотину П-4 [7, 21] в %

Фракция взвешенных частиц (размер, мм)	Режим водного стока*, м <sup>3</sup> /с		Участок реки (длина участка)				Выход в р. Исеть
	$Q_0$	$Q_{\Sigma}$	П-4 – П-10 (5 км)	П-10 – П-11 (11 км)	П-11 – Мусломово (38 км)	Мусломово – устье (169 км)	
Глина (<0,004)	1,2	2,0	45,31	44,05	10,36	0,28	0
	1,2	10,0	45,26	44,15	9,56	1,03	0
	1,2	60,0	46,21	43,84	7,31	1,69	0,95
	8,0	8,0	15,30	30,30	41,50	12,60	0,30
Очень мелкий ил (0,004–0,008)	1,2	2,0	61,69	35,83	2,48	0	0
	1,2	10,0	61,64	35,88	2,40	0,08	0
	1,2	60,0	62,79	35,0	1,94	0,15	0,12
	8,0	8,0	22,40	39,30	34,20	4,10	0
Мелкий ил (0,008–0,016)	1,2	2,0	97,77	2,23	0	0	0
	1,2	10,0	97,73	2,27	0	0	0
	1,2	60,0	97,98	2,02	0	0	0
	8,0	8,0	63,50	34,30	2,20	0	0
Средний ил	1,2	2,0	100	0	0	0	0
	1,2	10,0	100	0	0	0	0
Крупный ил	1,2	60,0	100	0	0	0	0
	8,0	8,0	100	0	0	0	0
Все фракции песка	1,2	2,0	100	0	0	0	0
	8,0	8,0	100	0	0	0	0

Примечание. \*  $Q_0$  – расход воды в створе плотины П-4;  $Q_{\Sigma}$  – расход воды в устье р. Теча.



течении реки, практически не отличался от режима форсированных водных сбросов.

Результаты расчетов по реконструкции радиоактивного загрязнения поймы реки и реконструкции сброса  $^{137}\text{Cs}$  с ЖРО приведены в табл. 7.

Анализ результатов, приведенных в табл. 7, показывает, что расчетное значение поступления активности  $^{137}\text{Cs}$  со сбросами ЖРО в октябре 1951 г. – 50,3 кКи – хорошо (в пределах 15 %) соответствует результатам реконструкции, полученным ранее [1] – 59,1 кКи. Следует еще раз отметить, что приведенные в табл. 7 расчетные результаты получены для распределения только одной – самой мелкодисперсной – фракции взвесей (“глина”). Очевидно, что реальное радиоактивное загрязнение поймы реки  $^{137}\text{Cs}$  сформировалось в результате осаждения взвешенных частиц различного гранулометрического состава.

Поэтому, можно считать, что полученное выше расчетное значение суммарного поступления  $^{137}\text{Cs}$  в р. Теча со сбросами ЖРО (50,3 кКи) является нижней оценкой реального поступления.

Хорошее совпадение вышеуказанных результатов подтверждает корректность реконструкции источника сбросов ЖРО в р. Теча (за период с 1949 по 1951 гг.).

Следует отметить, что в период “промывки” водоемов В-3 и В-4 (17–22 октября 1951 г.) через плотину П-4 в р. Теча поступило большое количество взвесей, образовавшихся в результате взмучивания донных отложений указанных водоемов. Выполненные расчеты показали [8, 22], что в период “промывки” взмучиванию подверглось от 20 до 40 % общей площади донных отложений реки и водоемов. В работах [7, 8, 22] было показано, что при этом в открытую гидрографическую систему р. Теча через плотину П-4

Таблица 7

Расчетное относительное распределение массы (доли) осевших частиц градации “глина” (2–4 мкм) на различных участках р. Теча, выполненное по ГДМ “ТЕЧНА-SED2” (от точки сброса ЖРО до створа плотины П-4) –  $\delta_1$  и ГДМ “ТЕЧНА-SED” (от плотины П-4 до устья реки) –  $\delta_2$  и реконструкция распределения депонированной активности  $^{137}\text{Cs}$  –  $A_0$  (октябрь 1951 г.)

Участок реки	Доля массы взвесей, отн.ед.			$A_0^*$ , кКи
	“ТЕЧНА-SED2”, $\delta_1$	“ТЕЧНА-SED”, $\delta_2$	Весь участок, $\delta_1 \cdot \delta_2$	
Поступило в точке сброса ЖРО	1,000	–	1,000	50,3
Осело на участке реки до водоема В-3	0,008	–	0,008	0,402
Осело в водоеме В-3	0,037	–	0,037	1,86
Осело в водоеме В-4	0,204	–	0,204	10,3
Вышло из водоема В-4	0,751	1,000	0,751	37,8
Осело на участке реки от плотины П-4 до створа плотины П-10	–	0,153	0,115	5,8
Осело на участке от плотины П-10 до створа плотины П-11	–	0,303	0,228	11,5
Осело на участке от плотины П-11 до створа с. Муслимово	–	0,415	0,312	15,7*
Осело на участке от с. Муслимово до устья	–	0,126	0,0946	4,8
Ушло в р. Исеть	–	0,0030	0,0023	0,116
Всего	1,000	1,000	1,000	50,3

Примечание. \* – Абсолютные значения активности  $^{137}\text{Cs}$  получены путем нормировки расчетного относительного распределения осаждения массы мелкодисперсных взвесей.



дополнительно могло поступить до 1 млн.Ки активности бета-излучающих радионуклидов, которые накопились в донных отложениях водоемов В-3 и В-4 за весь предшествующий период времени. Оценка мощности этого внутреннего источника поступления активности в р. Теча выходит за рамки данной работы.

### 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РЕКОНСТРУКЦИИ И РЕКОМЕНДАЦИИ НА БУДУЩЕЕ

Основные результаты реконструкции помесячных сбросов всех видов ЖРО в р. Теча за период с мая 1949 г. по октябрь 1951 г. (включи-

тельно) приведены в табл. 8 [1] в сравнении с результатами полученными ранее при имитационном моделировании [8-10]. В архивах предприятия имеется информация о ежемесячных сбросах активности ЖРО в р. Теча [1], начиная с октября 1951 г.

Поступление радионуклидов в р. Теча с ЖРО в период с декабря 1948 г. по апрель 1949 г., по-видимому, было незначительным по следующим причинам:

- во-первых, из-за малых объемов переработки урана на заводе "Б" в этот период времени;

- во-вторых, можно полагать, что в начальный период сбросов основная часть

Таблица 8

Результаты реконструкции регламентных и зарегистрированных аварийных сбросов в р. Теча за период с 1949 по 1951 гг. [1], в сравнении данными метода имитационного моделирования (МИМ) [8-10] и данными Д.И. Ильина (1956 г.) [14]

в Ки

Нуклид	Результаты реконструкции [1]				Результаты реконструкции МИМ [8-10] (1949-1954 гг.)	Ильин Д.И. [14]	
	регламентные сбросы (1949-1951 гг.)	нерегламентные сбросы 1951 г.		Всего (1949-1951 гг.)			
		сентябрь	октябрь				
$^{95}\text{Zr} + ^{95}\text{Nb}$	1047	131	126	1304	2400	370	
$^{140}\text{Ba} / ^{140}\text{La}$	49,1	0,8	0	50	93	240	
$^{89}\text{Sr}$	283	29,5	8,9	321	666		
$^{90}\text{Sr} / ^{90}\text{Y}$	8,3	1,6	57	70	24	320	
$^{103}\text{Ru} / ^{103\text{m}}\text{Rh}$	392	13,4	1,1	408	646	710	
$^{106}\text{Ru} / ^{106}\text{Rh}$	35,1	2,3	42,8	80	17,5		
$^{137}\text{Cs} / ^{137\text{m}}\text{Ba}$	37,7	1,6	59,1	98	25	350	
$^{91}\text{Y}$	323	41,7	23,4	388	835	740 (все РЗЭ)	
$^{141}\text{Ce}$	220	18,5	0,48	239	550		
$^{144}\text{Ce} + ^{144}\text{Pr}$	374	73	1110	1557	1153		
$^{147}\text{Nd}$	10,3	0,12	0	10,4	-		
$^{143}\text{Pr}$	48,8	1,0	0	50	-		
$^{131}\text{I}$	5,8	0,015	0	5,8	-		
$^{125}\text{Sb}$	-	0,072	2,05	2,1	-		
$^{151}\text{Sm}$	-	0,037	1,4	1,4	-		
$^{155}\text{Eu}$	-	0,049	1,56	1,6	-		
$^{147}\text{Pm}$	28,9	6,06	172	207	-		
Сумма	2922	323	1663	4908	6410		2730

Примечание. Активность  $^{103\text{m}}\text{Rh}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  на торцевом счетчике не регистрировалась, поэтому суммарная активность посчитана только с учетом  $^{90}\text{Y}$ .



образовавшейся активности была сорбирована на стенках трубопроводов и канализационных систем.

Приведенные в табл. 8 данные включают:

– все виды регламентных технологических ЖРО;

– нетехнологические регламентные ЖРО;

– зарегистрированные нерегламентные (аварийные) сбросы ЖРО в период 27–29 сентября 1951 г., в первой и второй декадах октября 1951 г.

Выполненный анализ (см. разд. 1 и 2) показывает, что полученные разными методами независимые оценки суммарного поступления основных долгоживущих радионуклидов ( $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) в открытую гидрографическую систему р. Теча хорошо соответствуют результатам реконструкции (табл. 8) [1]. Это означает, что кроме рассмотренных выше трех зарегистрированных аварийных сбросов (в сентябре и октябре 1951 г.) других значительных сбросов нерегламентных ЖРО в р. Теча с большим (более 100 сут) временем выдержки – не было.

Следует отметить, что полученные в работе [1] результаты восстановления параметров источника сбросов, в целом, хорошо соответствуют аналогичным результатам, полученным ранее [8–10], с учетом параметров аварийного сброса ЖРО в октябре 1951 г. (информация об этом сбросе была найдена в архивах ПО “Маяк” только в 2006 г. и не учитывалась в работах [8–10]). Тем не менее, выполненные ранее расчетные дозиметрические оценки [23–24], основанные на результатах МИМ, позволяют сформулировать важные рекомендации для продолжения работ по дальнейшему уточнению параметров источника сбросов.

Основной целью выполненных работ по реконструкции радионуклидного состава и суммарной активности ЖРО, поступивших в р. Теча (1949–1951 гг.), является пересмотр (и при необходимости – корректировка) радиационных доз внутреннего и внешнего облучения населения, проживавшего на р. Теча. Поэтому, анализ полноты и достоверности полученных в данной работе результатов реконструкции параметров источника сбросов ЖРО в р. Теча следует проводить с позиции достаточности полученной информации для корректной оценки доз облучения населения.

Ранее в работах [8, 23–26] было показано, что для получения надежных дозовых оценок необязательно с высокой степенью достоверности знать параметры источника сбросов для всех радионуклидов.

В каждом конкретном случае, для каждого критического органа и каждого пути радиационного воздействия на человека существуют свои критические радионуклиды, которые и определяют основную часть дозы облучения.

### 3.1. Внутреннее облучение

Известно, что основным реперным радионуклидом, определяющим дозы внутреннего облучения жителей когорты р. Теча, является  $^{90}\text{Sr}$  [5]. В УНПЦ РМ накоплен огромный фактический материал о содержании  $^{90}\text{Sr}$  в организме жителей прибрежных районов р. Теча. Эта информация получена методом аутопсии и методом прямых прижизненных измерений с использованием специального счетчика излучения человека СИЧ–9.1 [5]. Данные о содержании  $^{90}\text{Sr}$  в организме человека (в конкретный момент времени) позволяют с использованием специальных возрастных дозиметрических моделей и моделей метаболизма рассчитать дозу облучения любого органа.

Экспериментальную информацию о содержании в организме жителей когорты р. Теча других радионуклидов, присутствовавших в составе сбрасываемых ЖРО, получить невозможно, поскольку они или подверглись радиоактивному распаду, или были в течение нескольких месяцев после поступления выведены из организма естественным образом (например,  $^{137}\text{Cs}$ ). Поэтому, дозы внутреннего облучения жителей р. Теча, обусловленные поступлением активности в организм человека с речной водой (и продуктами питания), можно оценить только расчетным образом на основе реконструированной информации о параметрах источника сброса ЖРО.

Выполненные предварительные расчетные исследования [13, 23, 24] показали, что основная (более 95 %) часть дозы внутреннего облучения красного костного мозга (ККМ) и костной поверхности (КП) обусловлена излучением только двух радионуклидов  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{90}\text{Sr}$ , причем доза от  $^{90}\text{Sr}$  соизмерима, а для некоторых воз-



растных групп превосходит, дозу от  $^{90}\text{Sr}$ . Доза внутреннего облучения желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) обусловлена, в основном, только излучением  $^{90}\text{Sr}$ , вклад которого в суммарную дозу для жителей верхнего и среднего течения р. Теча составляет 75–87 %, а вклад  $^{90}\text{Sr}$  не превышает 3–4 %. Доза облучения половых органов (семенников) обусловлена в основном излучением только двух радионуклидов –  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ , суммарный вклад которых в общую дозу составляет 80–90 %.

Таким образом, для корректного учета дозы внутреннего облучения жителей р. Теча важнейшим параметром источника сбросов ЖРО является отношение активности  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Sr}$ . При этом необходимо использовать имеющуюся в УНПЦ РМ экспериментальную информацию о содержании  $^{90}\text{Sr}$  в организме жителей бассейна р. Теча в качестве реперной, а суммарную дозу внутреннего облучения, обусловленную поступлением в организм других радионуклидов (главным образом  $^{90}\text{Sr}$ ) учитывать с использованием поправочных расчетных коэффициентов.

### 3.2. Внешнее облучение

Основным реперным радионуклидом для оценки доз внешнего облучения жителей р. Теча является  $^{137}\text{Cs}$ . Известно, что пространственное распределение  $^{137}\text{Cs}$  в донных отложениях и на пойме верхней и средней части р. Теча имеет пятнистый вид и характеризуется высокой стабильностью ( $^{137}\text{Cs}$  прочно сорбирован на пойменных почвах). Это означает, что современное пространственное распределение радиационного поля (плотности потока гамма-квантов), обусловленного излучением  $^{137}\text{Cs}$  на пойменных участках реки, отличается от существовавшего в 1950-х гг. только за счет процесса радиоактивного распада и, частично, за счет заглупления  $^{137}\text{Cs}$  в пойменную почву. Эти отличия легко могут быть учтены расчетным образом.

Следует отметить, что первые радиационные измерения мощности дозы гамма-излучения в прибрежных районах р. Теча (ниже плотины П-4) были выполнены специалистами ПО "Маяк" только летом 1952 г., то есть спустя 8–9 месяцев после прекращения интенсивных сбросов ЖРО в октябре 1951 г.

Ранее в работах [7, 8, 25, 26] было показано, что в результате форсированных водных сбросов (июнь–октябрь 1951 г.) и при режиме промывки (17–22 октября 1951 г.) из донных отложений водоемов В-3 и В-4 с водным потоком было вынесено большое количество взвешенных веществ в виде ила и глины с суммарной активностью ~1 млн. Ки, и сформировалось обширное радиоактивное загрязнение поймы реки. В первый момент после радиоактивного загрязнения поймы реки мощность дозы внешнего облучения определялась, в основном, излучением сравнительно короткоживущих радионуклидов –  $^{95}\text{Zr}+^{95}\text{Nb}$  (~60–70 %) и  $^{103}\text{Ru}+^{103\text{m}}\text{Rh}$  (~20–30 %), а вклад излучения  $^{137}\text{Cs}+^{137\text{m}}\text{Ba}$  не превышал ~3–4 %. Вследствие естественного радиоактивного распада мощность дозы гамма-излучения на пойме реки быстро уменьшалась и к июлю 1952 г. сократилась в 13 раз, а к июлю 1953 г. – почти в 35 раз.

Все вышеуказанное означает, что для корректного определения дозы внешнего облучения жителей р. Теча за время их пребывания на загрязненной пойме в период с июня 1951 г. по июль 1952 г. важнейшее значение имеет отношение активностей  $(^{95}\text{Zr}+^{95}\text{Nb})/^{137}\text{Cs}$  и  $^{103}\text{Ru}/^{137}\text{Cs}$  в источнике сброса ЖРО.

### ВЫВОДЫ

1. С использованием нескольких различных независимых методов выполнены оценки поступления активности  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в р. Теча с регламентными и аварийными сбросами ЖРО в период с 1949 по 1951 гг. Показано, что полученные расчетные оценки хорошо совпадают с результатами реконструкции [1]. Это дает основание полагать, что других (кроме зарегистрированных в сентябре и октябре 1951 г.) мощных аварийных сбросов ЖРО в р. Теча, с "возрастом" продуктов деления более 100 сут, не было.

2. Отмечается, что для корректной оценки дозы внутреннего облучения жителей р. Теча особо важным параметром источника сброса ЖРО является отношение активностей  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Sr}$ , а для оценки доз внешнего облучения –  $(^{95}\text{Zr}+^{95}\text{Nb})/^{137}\text{Cs}$ ,  $^{103}\text{Ru}/^{137}\text{Cs}$ . Показано, что указанные отношения активностей определяются, в основном, режимом эксплуатации реактор-



ного производства (временем облучения урана в реакторе и продолжительностью хранения облученного урана в бассейне выдержки).

3. Для успешного достижения конечной цели работ – реконструкции дозы облучения жителей р. Теча – необходимо разработать новый или выполнить верификацию уже созданного на ПО “Маяк” комплекса математических моделей, предназначенного для описания переноса различных радионуклидов в речной системе р. Теча.

*Работа выполнена в рамках проекта МНТЦ № 2841.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Глаголенко Ю.В., Дрожко Е.Г., Мокров Ю.Г. и др. Восстановление параметров источника сбросов жидких радиоактивных отходов радиохимического производства в р. Теча. Сообщ. 1: Разработка методики и основные результаты // Вопросы радиац. безопасности. – 2008. – Спецвыпуск. – С. 76–91.
2. Y.V. Glagolenko, Y.G. Mokrov, P.M. Stukalov. Retrospective reconstruction of radionuclide contamination of the Techa River caused by liquid waste discharge from radiochemical production at the Mayak Production Association: 1949–1956. Technical Report to U.S. Department of Energy, Office of International Health Programs. – Ozersk, Mayak Production Association, 1998.
3. Мокров Ю.Г. Ретроспективное восстановление уровня радиоактивного загрязнения реки Теча, обусловленного сбросами жидких отходов радиохимического производства ПО “Маяк” в 1949–1956 гг. // Вопросы радиац. безопасности. – 1998. – № 3 и № 4.
4. Y.G. Mokrov, Y.V. Glagolenko, B.A. Napier. Reconstruction of Radionuclide Contamination of the Techa River Caused by Liquid Waste Discharge from Radiochemical Production at the Mayak Production Association // Health Physics. – 2000. – V. 79. – No. 1. – P. 15–23.
5. Медико-биологические и экологические последствия радиоактивного загрязнения р. Теча / Под ред. А.В. Аклеева, М.Ф. Киселева. – М., 2001. – 531 с.
6. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides : Part 1, Part 2/ ICRP Publication-56. Pergamon Press, Oxford, 1989.
7. Мокров Ю.Г. Реконструкция и прогноз радиоактивного загрязнения реки Теча. Часть I. Роль взвешенных частиц в процессе формирования радиоактивного загрязнения реки Теча в 1949–1951 гг. // Биб-ка журнала “Вопросы радиац. безопасности”. – 2002. – № 1. – 176 с.
8. Мокров Ю.Г. Реконструкция и прогноз радиоактивного загрязнения реки Теча. Часть II. Реконструкция радиационной обстановки и оценка доз облучения населения прибрежных районов р. Теча за период 1949–1954 гг. // Биб-ка журнала “Вопросы радиац. безопасности”. – 2003. – № 2. – 143 с.
9. Мокров Ю.Г. Реконструкция радиоактивного стока основных радионуклидов с водами р. Теча в период 1949–1954 гг. // Бюллетень Сибирской медицины. 2005. – Т. 4. – № 2. – С. 110–116.
10. Мокров Ю.Г. Реконструкция и прогноз радиоактивного загрязнения р. Теча: Автореферат дисс... на соискание ученой степени д-ра техн. наук. – Озерск, 2005. – 48 с.
11. Y.G. Mokrov. Radioactive contamination of bottom sediment in the upper reaches of the Techa River analysis of the data obtained in 1950 and 1951. Radiation and Environmental Biophysics. – 2003. – V. 42. – P. 155–168.
12. Y.G. Mokrov. External radiation exposure of residents living close to the Mayak facility – identification of the main sources, dose estimates, and comparison with earlier assessments // Radiation and Environmental Biophysics. – 2004. – V. 43. – P. 127–139.
13. Мокров Ю.Г. Радиозоологические особенности формирования доз внутреннего облучения жителей бассейна р. Теча в 1949–1954 гг. // Мед. радиология и радиац. безопасность. – 2006. – Т. 51. – № 5. – С. 5–20.
14. Ильин Д.И. Миграция радиоактивных веществ из открытых водоемов: Дисс... на соискание ученой степени д-ра техн. наук / Архив ПО “Маяк”, ф. 11, оп. 30, ед.хр. 839. – Озерск, 1956. – 270 с.
15. Методика прогнозирования состояния загрязнения водоемов при нарушении нормальной эксплуатации АЭС: Методические указания / Государственный комитет СССР по Гидрометеорологии. – М., 1988. – 49 с.
16. Колосов И.А. Изучение самоочищения рек, загрязненных долгоживущими радиоактивными



- ми изотопами: Дисс... на соискание ученой степени канд. техн. наук / Институт прикладной геофизики. – М., 1968. – 226 с.
17. Радиоактивное загрязнение речной системы в районе ПО “Маяк” в 1977 и 1978 гг.: Отчет / Л.И. Геденов, Ю.Д. Корсаков, О.С. Цветков и др.; Радиевый институт, ПО “Маяк”. – Ленинград, 1981. – 82 с.
18. Физико-химическое состояние и распределение плутония в донных отложениях и пойме реки Теча: Отчет по договору ОН-92-13 / Голощапов П.В., Попова И.Я., Суркова Л.В. и др.; Филиал № 4 Института Биофизики. – Челябинск, 1992. – 37 с.
19. Влияние промышленных стоков завода им. Менделеева, сбрасываемых в р. Теча на санитарные условия жизни и здоровья населения прибрежных пунктов: Отчет / Марей А.Н. и др., Архив ПО “Маяк”. – Озерск, 1952.
20. Отчет комиссии ПГУ о загрязнении территории, прилегающей к заводу им. Менделеева [Текст]: отчет / ПГУ, ГХЗ им. Менделеева, Александров А.П., Мишенков Г.В., Тарасенко Н.Ю., Зайцев Б.А., Штуккенберг Ю.М., Летавет А.А., Ильин Д.Н. – М., 1951. – 81 с.
21. Y.G. Mokrov, D.M. Shagin. The role of suspended particles in the process of formation of radioactive contamination of the Techa River in 1949–1951 // Proceedings from the “The 5<sup>th</sup> International Conference on Environmental Radioactivity in the Arctic and Antarctic. St. Petersburg, Russia, 16–20 June 2002”. – P. 63–66.
22. Y.G. Mokrov. Radioactive contamination in the upper part of the Techa River: stirring-up of bottom sediments and precipitation of suspended particles. Analysis of the data obtained in 1949–1951 // Radiation and Environmental Biophysics. – 2004. – V. 42. – P. 285–293.
23. Мокров Ю.Г. Вклад <sup>90</sup>Sr в дозу облучения населения р. Теча в период 1949–1956 // Материалы международной конференции “Медико-дозиметрические регистры – основа регламентации радиационной безопасности профессионалов и населения” (07–11 июля 2004 г.). – М., 2004. – С. 38–39.
24. Мокров Ю.Г. Оценка доз внутреннего и внешнего облучения жителей сел Метлино и Муслумово, обусловленных проживанием на р. Теча в период 1949–1954 гг. // Вопросы радиац. безопасности. – 2003. – Спецвыпуск. – С. 41–52.
25. Y.G. Mokrov. Internal and external dose assessment for population of Metlino and Muslymovo living along the Techa River from 1949 to 1954 // Radiation and Environmental Biophysics. – 2007. – V. 43. – P. 209–218.
26. Y.G. Mokrov. A reconsideration of the external dose assessment for the Techa River population // Radiation and Environmental Biophysics. – 2002. – V. 41. – No. 4. – P. 303–306.