

УДК 546.42 : 551.48
© 2007

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ р. ТЕЧА

*Ю.В. Глаголенко, Е.Г. Дрожко, Ю.Г. Мокров
Россия, г. Озерск, ФГУП "ПО "Маяк"*

В период 1949–1956 гг. при выполнении Производственным объединением (ПО) "Маяк" Государственной оборонной программы, производились регламентные (предусмотренные техническим проектом и аварийные сбросы жидких радиоактивных отходов (ЖРО) в открытую гидрографическую систему р. Теча.

В состав сбрасываемых ЖРО входили в основном бета-излучающие радионуклиды осколочного происхождения с периодом полураспада от нескольких суток до десятков лет и незначительная часть ("следы") альфа-излучающих нуклидов (U, Pu, Am). К середине 1960-х годов практически все радионуклиды, содержащиеся в составе сбрасываемых ЖРО подверглись естественному радиоактивному распаду, а радиоактивное загрязнение речной системы стало определяться только долгоживущими ^{90}Sr и ^{137}Cs и, в значительно меньшей степени, плутонием ($^{238, 239, 240}\text{Pu}$) и ^{99}Tc .

Основная часть активности указанных радионуклидов депонирована на заболоченном участке поймы (Асановские болота) в верхней части р. Теча.

В работе рассматриваются следующие источники радиоактивного загрязнения воды р. Теча:

- сорбция-десорбция активности из Асановских болот (^{90}Sr);
- взмучивание донных отложений и перенос активности со взвесьями (^{137}Cs , Pu);
- поверхностно-склоновый радиоактивный сток с водосборной территории р. Теча, загрязненной в результате аварий 1957 и 1967 гг. (^{90}Sr , ^{137}Cs);
- фильтрационное поступление активности из Теченского каскада водоемов (третий, ^{90}Sr).

Приведены данные о запасе активности ^{90}Sr , ^{137}Cs , Pu и ^{99}Tc , депонированной на различных участках реки.

Представлен анализ экспериментальных и расчетных данных об объемной активности и радиоактивном стоке трития, ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{99}Tc и плутония с водами р. Теча в зависимости от расхода воды в реке.

В 1949–1956 гг. ПО "Маяк" производило сбросы жидких радиоактивных отходов (ЖРО) в р. Теча, причем, основная часть активности (более 99 %) поступила в воды реки до ноября 1951 г. В состав ЖРО входили радионуклиды осколочного происхождения с периодом полураспада от нескольких суток до десятков лет. В результате, крупномасштабному радиоактивному загрязнению подверглись все компоненты р. Теча (вода, донные отложения, пойма, растительность, биота).

С началом эксплуатации в 1948 г. ПО

"Маяк", гидрографическая система верхней части р. Теча претерпела ряд существенных изменений, связанных с созданием в верховье реки Теченского каскада водоемов (ТКВ) и обводных каналов (рис. 1) [1].

Сбросы ЖРО перед поступлением в открытую гидрографическую систему р. Теча сначала направлялись в проточный водоем-отстойник В-3 (Кокшаровский пруд), построенный в августе 1951 г., а затем – в водоем В-4 (Метлинский пруд). В 1956 г., в 12 км ниже точки сброса ЖРО русло реки было перекрыто земляной

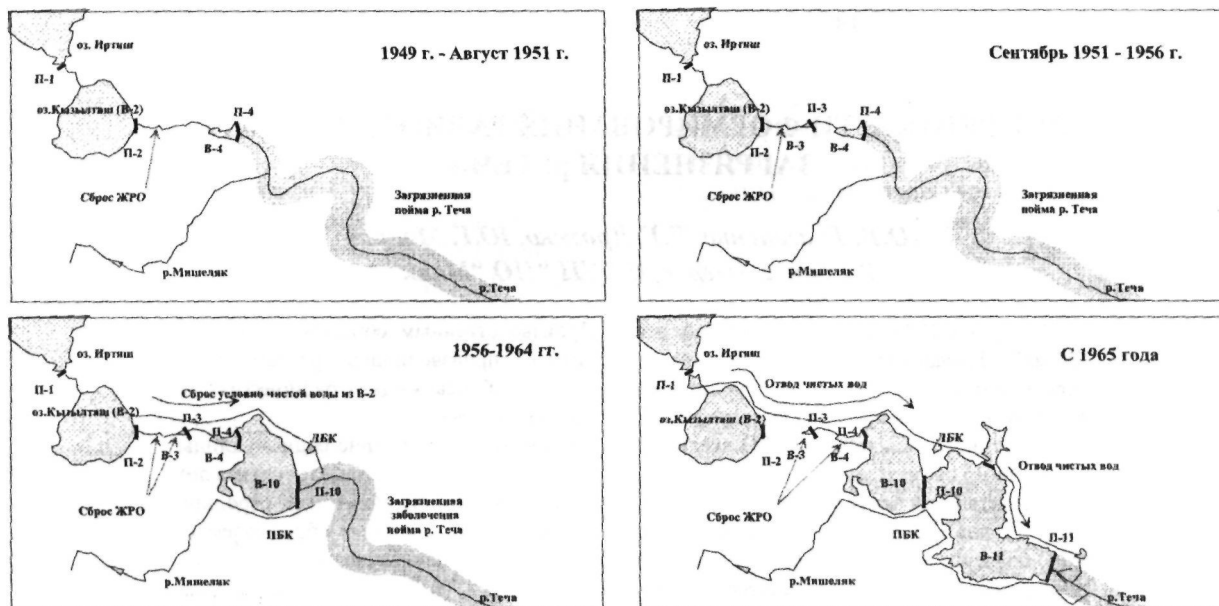


Рис. 1. Этапы строительства и реконструкции гидротехнических сооружений в верховье р. Теча

плотиной и создан водоем В-10, что позволило полностью прекратить поступление радионуклидов в открытую гидрографическую систему. Позднее, в 1964–1965 гг. ниже по течению реки был сооружен еще один непроточный водоем В-11. С этого момента времени в верховье р. Теча эксплуатируется сложная гидротехническая система (ГТС), включающая четыре водоема, ограждающие дамбы и обводные каналы, которая получила название Теченского каскада водоемов (ТКВ). Несмотря на предпринятые меры радиоактивное загрязнение р. Теча остается до сих пор значительно выше глобального уровня [1–3].

В настоящее время радиоактивное загрязнение воды р. Теча обусловлено только ^{90}Sr , а содержание других радионуклидов (^{137}Cs , плутоний, тритий) значительно (в 10–1000 раз) меньше уровня вмешательства по НРБ-99.

1. АНАЛИЗ ИСТОЧНИКОВ ВОДНОГО ПИТАНИЯ И ПОСТУПЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ВОДЫ р. ТЕЧА

В настоящее время водное питание р. Теча в верховье формируется стоком воды по

левобережному и правобережному каналам (ЛБК и ПБК). Гидрологические наблюдения и контроль радиоактивного загрязнения воды в каналах регулярно проводятся начиная с 1960-х гг. в рамках программы штатного мониторинга ПО “Маяк”.

На некоторых участках ТКВ водоемы В-10 и В-11 вплотную примыкают к разделительным дамбам, сооруженным вдоль каналов. Существует фильтрационная связь между каналами и водоемами, причем выше “нулевой” точки (точка, где уровни воды в канале и водоеме равны) фильтрация направлена от канала к водоему, а ниже “нулевой” точки – от водоема к каналу. Поступление активности в воды ЛБК и ПБК определяется фильтрационными и сорбционными свойствами грунтов и разностью уровней воды в водоемах В-10, В-11 и в каналах.

Часть фильтрующей через плотину П-11 воды перехватывается дренажной системой и возвращается обратно в водоем В-11. Другая часть воды, фильтрующей под телом плотины и через дно водоема не перехватывается дренажной системой и, в конечном итоге, разгружается в р. Теча. По некоторым оценкам общие фильтрационные потери из водоема

В-11 могут достигать 10–15 млн. м³/год. Удельная активность ⁹⁰Sr в воде водоема В-11 составляет ~1500 Бк/л, поэтому из водоема ежегодно с фильтратом уходит ~400–600 Ки ⁹⁰Sr (15–22 ТБк), но в открытую гидрографическую систему р. Теча поступает (2000–2005 гг.) всего 23–65 Ки/год за счет сорбции ⁹⁰Sr в грунтах. Среднее значение удельной активности трития (³H) в воде водоема В-11 составляет (2000–2005 гг.) ~900 Бк/л, следовательно, в подземные воды и непосредственно в воды р. Теча ежегодно поступает ~240–360 Ки/год (табл. 1).

Поступление ¹³⁷Cs и плутония в р. Теча с водами фильтрующимися из водоемов ТКВ пренебрежительно мало и не может быть зафиксировано действующими на ПО “Маяк” методами радиационного контроля по следующим причинам:

– удельная активность ¹³⁷Cs и суммы изотопов плутония (Σ Pu) в воде водоема В-11 не превышает ~3 Бк/л и ~0,005 Бк/л, соответственно [3];

– высокие сорбционные свойства ¹³⁷Cs и плутония ограничивают миграционную способность этих радионуклидов, поэтому, защитный барьер в виде суглинистой боковой ограждающей дамбы (шириной всего 10–15 м) является практически непреодолимым препятствием.

Село Муслумово расположено в среднем течении р. Теча на расстоянии ~50 км от плоти-

ны П-11 и является самым верхним (ближайшим к ПО “Маяк”) населенным пунктом, а проживающее в селе население является критической группой для жителей р. Теча.

Результаты многочисленных экспериментальных исследований показывают, что основная часть активности долгоживущих радионуклидов (⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs, Σ Pu, ⁹⁹Tc) депонирована в заболоченной пойме реки (Асановские болота), расположенной на участке от плотины П-11 до с. Муслумово. В период сбросов ЖРО в р. Теча (1949–1956 гг.) заболоченные участки верховья реки интенсивно задерживали сбрасываемую активность, выполняя роль своеобразного природного фильтра. Накопление активности в Асановских болотах происходило в результате процессов сорбции (для растворимых в воде форм радионуклидов) и осаждения на дно природных и техногенных взвесей, загрязненных радионуклидами. В последующий период времени (начиная с 1957 г.) заболоченный участок реки являлись основным внутренним источником вторичного загрязнения воды реки в результате процессов десорбции (для ⁹⁰Sr) и водной эрозии (для ¹³⁷Cs, Pu и ⁹⁹Tc).

В табл. 2 приведены данные о запасе основных долгоживущих радионуклидов депонированных в донных отложениях и пойме реки на верхнем и нижнем участках.

Таблица 1

Характеристика источников фильтрационного поступления ⁹⁰Sr и ³H из ТКВ в воды р. Теча (2000–2005 гг.)

Параметр	Источники фильтрационного поступления ⁹⁰ Sr и ³ H			Всего
	ЛБК	ПБК	Фильтрат под телом плотины П-11	
Объем фильтрующейся воды, млн. м ³ /год	3–6	2–3	5–8	10–15
Поступление с фильтратом в воды р. Теча, Ки/год (ТБк/год):				
– ⁹⁰ Sr	10–40 (0,4–1,5)	13–30 (0,5–1,1)	0	23–65 (0,9–2,4)
– ³ H	70–140 (2,7–5,4)	50–70 (1,8–2,7)	120–190 (4,5–7,2)	240–360 (9–14)

Таблица 2

Оценка запаса радионуклидов депонированных на различных участках речной системы р. Теча (2005 г.) [2, 4] в Ки (ТБк)

Радионуклид	Участок речной системы	
	Плотина П-11 – с. Муслюмово	с. Муслюмово – устье
⁹⁰ Sr	520 (19)	30 (1,1)
¹³⁷ Cs	4200 (155)	450 (17)
Σ Pu	18,5 (0,68)	3,0 (0,11)*
⁹⁹ Tc	8,4 (0,31)	0,72 (0,027)

Примечание. * – около 50 % содержащегося плутония имеет глобальное происхождение.

Основными внешними факторами, определяющими удельную активность воды и радиоактивный сток р. Теча (в жидкой и твердой форме), являются режим водного стока и мощность источника поступления активности воды через ГТС (ЛБК и ПБК).

В табл. 3 и 4 приведены характеристики источников водного питания и поступления ⁹⁰Sr в ЛБК и ПБК, полученные путем прямых инструментальных измерений или методом расчетных оценок за период 2000–2005 гг.

Анализ данных, приведенных в табл. 3 и 4 показывает, что основными источниками водного питания реки являются: санитарный попуск воды из оз. Иртяш (до 60–70 %), поверхностно-склоновый и грунтовый приток (до 10–20 %) и

Таблица 3

Параметры основных источников водного питания и поступления ⁹⁰Sr в воды ЛБК за период 2000–2005 гг.

Источник	Поступление	
	воды, млн. м ³ /год	⁹⁰ Sr, Ки/год
Перепуск воды из оз. Иртяш	15–160	0,002–0,2
Сброс хозяйственных вод г. Озерска (оз. Иртяш)	14–17	~0,02
Сброс воды из оз. Бердениш (по мере необходимости)	0–10	0–1,5
Поверхностный и грунтовый сток с загрязненной территории	5–30	0,5–2,0
Фильтрат из водоемов ТКВ	3,0–6,0	10–40
Регулирующее влияние логов	±0,1	±10
Всего	46–242	10–43

Таблица 4

Параметры основных источников водного питания и поступления ⁹⁰Sr в воды ПБК (р. Мишеляк) за период 2000–2005 гг. [5]

Источник	Поступление	
	воды, млн. м ³ /год	⁹⁰ Sr, Ки/год
Сброс хозяйственных вод пос. № 2, г. Озерска (оз. Б.Акуля)	0,4–0,6	~0,003
Фильтрат оз. Татыш (водоем В-6)	0,3–0,7	~0,06
Сброс хозяйственных вод пос. Новогорный (подземный водозабор)	~2,5	<0,015
Фильтрат золоотвала Аргаяшской ТЭЦ (оз. Улагач)	~4,5	~0,06
Поверхностный и грунтовый сток с загрязненной территории	2–10	0,1–0,5
Фильтрат из водоемов ТКВ	2–3	12–30
Всего:	14–22	13–32

техногенные сбросы хозяйственных вод (до 10 %). В результате фильтрации воды из ТКВ через и под ограждающие дамбы в ЛБК и ПБК в воды р. Теча поступает не более 4–8 млн. м³/год (~5 % от суммарного водного стока), но именно этот источник обеспечивает основное (до 95 %) поступление ⁹⁰Sr в воды реки.

2. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПЕРЕНОСА ⁹⁰Sr В РЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

До 1987 г. основным источником поступления ⁹⁰Sr в каналы являлся поверхностный сток радионуклидов с прилегающих территорий загрязненных в результате аварии 1957 г. Начиная с 1987 г., когда уровень воды в водоеме В-11 превысил отметку 215,5 м, загрязнение воды в каналах ⁹⁰Sr стало определяться процессом фильтрации воды из водоема В-11 в ЛБК и ПБК (рис. 2 и табл. 5).

Приведенная на рис. 3 зависимость показывает, что при увеличении уровня воды в водоеме В-11 всего на 1,5 м (с 215,5 до 217,0 м)

фильтрационное поступление ⁹⁰Sr в ЛБК и ПБК возрастает в 6 раз (с ~9 до ~54 Ки/год).

Анализ данных таблицы 5 показывает, что до середины 1990-х гг. основным (до 70–80 %) источником загрязнения воды р. Теча являлась заболоченная пойма реки в районе Асановских болот (внутренний источник). Вымывание ⁹⁰Sr из поймы происходило в результате взаимодействия воды реки с загрязненными пойменными грунтами, как собственно речных (паводковых) вод во время разлива реки, так и стекающих из поймы в речное русло поверхностно-склоновых и грунтовых вод.

После 1995 г. загрязнение воды в реке стало все в большей степени определяться внешним источником фильтрационного поступления ⁹⁰Sr. Проиллюстрируем это утверждение на основе простой полуэмпирической модели.

Основные положения предложенной ранее сорбционной прогностической модели [2] получены в предположении, что в воде реки ⁹⁰Sr находится преимущественно в растворенных (ионных) формах, а процесс сорбции-десорбции

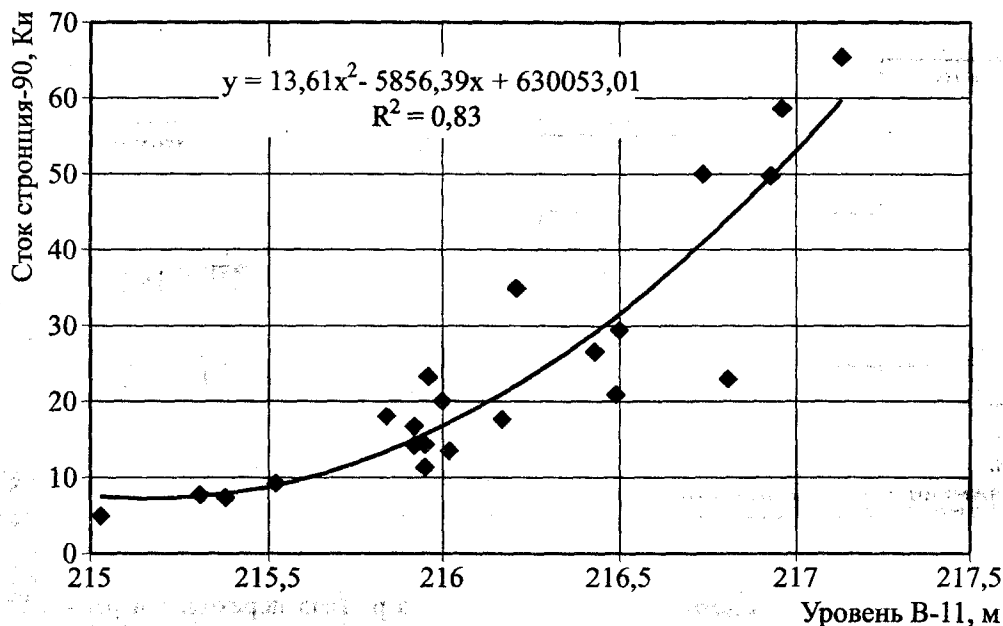


Рис. 2. Зависимость суммарного фильтрационного поступления ⁹⁰Sr в ЛБК и ПБК (Ки/год) от уровня воды в водоеме В-11

Таблица 5

Сток ^{90}Sr в верховье реки через ГТС (ЛБК и ПБК) и в р. Теча, створ с. Муслюмово, за период 1984–2005 гг.

Дата	Сток стронция-90, Ки/мес		Отношение (R)/(D)
	Поступление с ГТС ПО "Маяк" (D)	р. Теча, с. Муслюмово (R)	
1984	7,66	29,05	3,8
1985	7,31	29,60	4,05
1986	9,15	29,44	3,2
1987	16,65	87,40	5,3
1988	14,19	48,40	3,4
1989	20,00	53,5	2,7
1990	34,86	88,6	2,5
1991	14,32	50,9	3,6
1992	13,53	57,9	4,3
1993	26,48	90,5	3,4
1994	20,87	84,8	4,1
1995	17,53	30,1	1,7
1996	11,31	18,3	1,6
1997	23,10	18,4	0,8
1998	17,92	21,7	1,2
1999	29,35	33,7	1,2
2000	22,94	35,3	1,5
2001	58,63	68,8	1,2
2002	65,35	94,2	1,4
2003	49,78	61,4	1,2
2004	50,00	44,0	0,88
2005	45,30	43,2	0,95

– обратим. Если в течение некоторого промежутка времени $t = T$ мощность источника поступления ^{90}Sr в речную систему на входном створе (через ГТС) – D и расход воды на выходном створе (с. Муслюмово) – Q , постоянны во времени, то изменение запаса активности ^{90}Sr , депонированного в пойме и донных отложениях верхнего участка р. Теча (от створа плотины П-11 до створа с. Муслюмово) – $A(t)$, можно описать следующим простым уравнением:

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} + \frac{D}{\tau} (1 - e^{-\lambda t}), \quad (1)$$

$$\tau = \lambda + \alpha Q,$$

где A_0 – активность ^{90}Sr , депонированного в пойму, на момент времени $t = 0$, Бк; $\alpha = 4,0 \cdot 10^{-4}$, млн. м³ – константа “вымывания”, не зависящая от времени, обратно пропорциональная, с точностью до постоянного сомножителя, коэффициенту распределения K_d и некоторым интегрированным образом учитывающая все возможное многообразие сорбционных свойств всех компонентов речной системы на рассматриваемом участке реки [2];

λ – постоянная распада ^{90}Sr (0,0241 год⁻¹);
 Q – водный сток (млн. м³/год) через выходной створ (с. Муслюмово);
 D – скорость поступления ^{90}Sr через входной створ (ЛБК и ПБК) рассматриваемого участка реки, Бк/год.

Из анализа уравнения (1) следует, что при $t \rightarrow \infty$

$$A(t) = \frac{D}{\tau} = \frac{D}{\lambda + \alpha Q} = A_\infty, \quad (2)$$

т.е. при постоянной (среднегодовой) скорости поступления радионуклидов на входном створе и постоянном (во времени) расходе воды на выходном створе запас ^{90}Sr в пойме со временем застabilизируется на некотором уровне A_∞ .

При этом сток ^{90}Sr в створе с. Муслюмово – R тоже “застabilизируется” на уровне:

$$R = \alpha A_\infty Q = \frac{D}{1 + \frac{\lambda}{\alpha Q}}, \quad (3)$$

Последнее уравнение можно записать в виде:

$$\frac{R}{D} = \frac{1}{\left(1 + \frac{\lambda}{\alpha Q}\right)} < 1, \quad (4)$$

т.е. при режиме “стабилизации” сток ^{90}Sr в створе с. Муслюмово будет меньше, чем сток через ГТС (ЛБК и ПБК).

Начиная с середины 1990-х гг. речная система р. Теча переходит в режим “стабилизации”, когда отношение R/D (см. уравнение (4)) стремится к единице (см. табл. 5), а в 2004–2005 гг. – $R/D < 1$.

В зимнюю межень (когда пойма реки

перемерзает) удельная активность воды определяется распределением активности ^{90}Sr только между водой и донными отложениями, а в летнюю межень значительную роль в перераспределении активности играет пойма реки (Асановские болота).

Следует отметить, что режим “стабилизации” – это некоторая математическая абстракция, поскольку в пределах каждого календарного года водный сток Q может изменяться в широких пределах (весеннее половодье – летняя или зимняя межень и т.п.). При изменении (увеличении/уменьшении) водного стока Q возникают переходные процессы, приводящие к перераспределению активности между водой и донными отложениями (поймой).

Если процесс стабилизации запаса ^{90}Sr в пойме установился, то поступление стронция в систему (D) полностью компенсируется процессами радиоактивного распада и вымывания (R).

По данным штатной системы мониторинга ПО “Маяк”, всего за последние 17 лет (1989–2005 гг.), через створ с. Муслюмово прошло ~895 Ки ^{90}Sr (см. табл. 5), что хорошо совпадает с соответствующими результатами расчета по уравнению (3) – 855 Ки [2]. Хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных позволяет утверждать, что не существует

других значимых источников поступления ^{90}Sr в речную систему р. Теча (кроме контролируемых фильтрационных источников поступления ^{90}Sr из ТКВ в воды ЛБК и ПБК). Другими словами, поступление ^{90}Sr с фильтрационными водами, разгружающимися в открытую гидрографическую систему р. Теча через и под телом плотины П-11 пренебрежительно мало ($<0,5$ Ки/год), поскольку длина “линий” тока фильтрационных вод может достигать нескольких сотен и даже тысяч метров, и при разгрузке ^{90}Sr полностью сорбируется на подстилающих подрусловых грунтах (см. табл. 1).

Следует отметить, что в пределах одного календарного года (когда мощность фильтрационного источника можно считать практически постоянной) удельная активность воды р. Теча в створе с. Муслюмово может изменяться (в зависимости от сезонного расхода воды в реке – Q) от 1–2 Бк/л (в паводок при $Q \geq 20$ м³/с) до 30–40 Бк/л (в межень при $Q \approx 1$ м³/с).

3. ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕНОСА ^{137}Cs , ^{99}Tc И Pu С ВОДАМИ Р. ТЕЧА

Контроль удельной активности и стока ^{137}Cs с водами р. Теча регулярно проводится на ПО “Маяк”, начиная со второй половины 1960-х гг. (табл. 6).

Таблица 6

Выборочные (типичные) значения годового водного стока – Q , среднегодовой удельной активности воды – C и годового радиоактивного стока ^{137}Cs – R в среднем (с. Муслюмово) и нижнем (с. Першино) течении р. Теча за период 1973–2000 гг.

Год	с. Муслюмово			с. Першино		
	Q , млн. м ³ /год	C , Бк/л	R , ТБк/год (Ки/год)	Q , млн. м ³ /год	C , Бк/л	R , ТБк/год (Ки/год)
1973	77,4	4,0	0,31 (8,3)	124,5	0,42	0,052 (1,4)
1974	85,4	2,7	0,23 (6,3)	143,8	0,37	0,053 (1,4)
1977	9,7	0,70	0,007 (0,18)	21,2	0,044	0,0009 (0,026)
1982	19,6	1,0	0,020 (0,55)	–	–	–
1995	107,3	0,67	0,072 (1,9)	190*	~0,074	0,014 (0,38) *
1998	60,5	0,78	0,047 (1,3)	110*	~0,08	0,009 (0,24) *
2000	296,4	0,56	0,17 (4,4)	–	–	–

Примечание. * – начиная с 1981 г. водный сток в створе с. Першино не измеряется, использованы расчетные оценочные значения.

Анализируя данные, приведенные в табл. 6, следует отметить, что годовой водный сток в устье р. Теча (с. Першино) обычно в 1,8–2,1 раза больше, чем в средней части реки (с. Муслюмово), а радиоактивный сток ^{137}Cs , как правило, в 5–7 раз меньше. Вместе с тем, хорошо известно, что начиная с 1970-х гг. радиоактивный сток ^{90}Sr на среднем и нижнем участках реки практически одинаков. Такое поведение ^{90}Sr и ^{137}Cs объясняется различными формами нахождения этих радионуклидов в речной воде. В работах [6–8] было показано, что основная часть активности ^{90}Sr (до 99 %) находится в растворенной (ионной) форме, а большая часть активности ^{137}Cs (более 75 %) содержится на взвешях.

Рассмотрим основные составляющие баланса ^{137}Cs депонированного на верхнем участке реки (от плотины П-11 до с. Муслюмово) в 1990-е гг. (табл. 7):

– запас ^{137}Cs на рассматриваемом участке реки по состоянию на 1991 г. оценен и принят, равным ~5700 Ки [9];

– поступление ^{137}Cs с гидротехнических сооружений (ГТС) через ЛБК и ПБК не превышало 0,5 Ки/год [3];

– ежегодное уменьшение запаса ^{137}Cs на верхнем участке реки за счет радиоактивного распада составило от 130 Ки/год (в 1991 г.) до ~100 Ки/год (в 2005 г.);

– ежегодный сток ^{137}Cs в створе с. Муслюмово не превышал 5 Ки/год, при среднем значении 3,5 Ки/год (см. табл. 6).

Следовательно, ежегодное уменьшение запаса ^{137}Cs на верхнем участке реки за счет “выноса”, его с водным потоком не превышало 0,1 % (остальные 99,9 % обусловлены радиоактивным распадом). Дополнительное поступление ^{137}Cs с ГТС (<0,5 Ки/год) пренебрежимо мало и его можно не учитывать в общем балансе. Таким образом, с достаточной для практических оценок точностью, можно считать, что на верхнем участке реки запас депонированного ^{137}Cs уменьшается по экспоненциальному закону с периодом полураспада ^{137}Cs (30 лет).

Для среднего (ниже с. Муслюмово) и особенно нижнего участка реки распределение составляющих общего баланса ^{137}Cs в речной системе имеет принципиально другой характер. Общий запас ^{137}Cs в пойме и донных отложениях реки (на участке от с. Муслюмово до устья) оценивается в ~450 Ки (по состоянию на начало 1990-х гг.) [7, 10, 11]. Ежегодное (среднее) снижение запаса ^{137}Cs в системе за счет процесса радиоактивного распада составляет ~9 Ки/год и за счет стока в р. Исеть 0,2–0,5 Ки/год, а ежегодное поступление (через створ с. Муслюмово) достигает 5 Ки/год, при среднем значении 3,5 Ки/год. Таким образом, можно считать, что на среднем участке р. Теча скорость снижения запаса ^{137}Cs в системе происходит значительно медленнее, чем скорость радиоактивного распада, а в нижней части (ниже с. Бугаево) запас ^{137}Cs на отдельных участках реки может оставаться неизменным или даже возрастать.

Постоянный контроль за содержанием α -

Таблица 7

Основные составляющие баланса ^{137}Cs в речной системе р. Теча по состоянию на начало 1990-х гг.

Параметр	Верхний участок плотина П-11 – с. Муслюмово	Нижний участок с. Муслюмово – с. Першино (устье)
Запас активности в речной системе (1991 г.), Ки	5700	450
Поступление активности в речную систему через входной створ, Ки/год*	<0,5	1–5
Сток активности на выходном створе, Ки/год*	1–5	0,2–0,5
Радиоактивный распад, Ки/год	130	9
Дебаланс, Ки/год	–130	–(3–7)

Примечание. * – в зависимости от гидрологического режима водного стока реки.

излучающих нуклидов (плутония) в воде р. Теча ПО "Маяк" не осуществляет в силу незначительной радиационной значимости указанного радионуклида. Тем не менее, результаты эпизодических измерений выполненные ПО "Маяк" и другими исследователями [3, 12, 13] в 1990-х гг. позволяют утверждать, что удельная активность $^{239, 240}\text{Pu}$ в водах р. Теча не превышает:

– 0,5 мБк/л для среднего течения (Муслумово);

– 0,15 мБк/л, для нижнего течения (Першино, Затеченское).

Указанные значения в (10^3 – 10^4) раз ниже установленных в НРБ-99 предельных норм содержания плутония в воде и в продуктах питания для населения. Содержание ^{99}Tc в водах р. Теча оказывается ниже предела обнаружения используемых методик [12, 13]. В работе [12] было показано, что распределения удельной активности ^{137}Cs , ^{99}Tc и плутония (ΣPu) по глубине донных отложений (34 см, 17 слоев по 2 см каждый) отобранных в 1996 г. в районе Асановских болот (с. Надыров Мост), имеют идентичный характер. При этом среднее (по всему керну) отношение удельных активностей равны $\Sigma \text{Pu}/^{137}\text{Cs} \approx 0,0038$, $^{99}\text{Tc}/^{137}\text{Cs} = 0,0015$. Детальный анализ всей имеющейся информации позволил показать [4], что в воде р. Теча ^{137}Cs , ^{99}Tc и $^{239, 240}\text{Pu}$ находятся в основном в виде мельчайших взвешенных частиц (с размером менее 4–5 мкм), которые поступают в речной поток в результате взмучивания (эрозии) донных отложений в районе Асановских болот. Интенсивность взмучивания донных отложений определяется скоростью течения воды, которая в свою очередь зависит от расхода воды в реке. Таким образом, радиоактивный сток ΣPu и ^{99}Tc с водами р. Теча в зависимости от водного стока можно оценить для створа с. Муслумово 4–20 и 1,5–8 мКи/год, а для створа с. Першино (устье) – 0,8–4 и 0,3–1,5 мКи/год, соответственно.

Максимальное годовое поступление трития в воды р. Теча через ГТС с фильтрационными потоками может достигать ~500 Ки/год (~19 ТБк/год). Данные многолетних наблюдений показывают, что удельная активность трития в воде р. Теча (створ с. Муслумово) в зависимости от водного стока изменяется от ~100–250 Бк/л (в годы нормальной и высокой водности) до ~500–800 Бк/л (в годы аномально низкой водности).

Указанные значения в 8–100 раз ниже уровня вмешательства (УВ) по НРБ-99 (УВ=7700 Бк/л), поэтому, тритий также не представляет реальной радиационной опасности для жителей прибрежных районов р. Теча.

ВЫВОДЫ

1. Начиная с 60-х гг., удельная активность воды р. Теча определяется в основном излучением ^{90}Sr . До середины 1990-х гг. основным (до 70–80 %) источником загрязнения воды в реке ^{90}Sr являлся "внутренний" источник вторичного загрязнения воды, обусловленный процессом десорбции ^{90}Sr из заболоченной поймы верхней части реки (Асановские болота).

2. В результате процессов десорбции и радиоактивного распада запас ^{90}Sr , депонированного в Асановских болотах сократился до ~700 Ки в 1997 г. и до ~500 Ки в 2005 г.

3. Начиная с 1987 г., когда уровень воды в водоеме В-11 ТКВ превысил отметку 215,5 м, все более заметный вклад в радиоактивное загрязнение воды реки стал вносить "внешний" источник, обусловленный процессом фильтрации загрязненных вод из водоемов ТКВ.

4. Фильтрационное поступление ^{90}Sr в ЛБК и ПБК и далее в р. Теча увеличивается с ростом уровня воды в водоеме В-11, причем эта зависимость имеет ярко выраженный нелинейный характер.

5. Начиная с середины 90-х гг. радиоактивное загрязнение воды р. Теча по ^{90}Sr стало определяться только "внешним" фильтрационным поступлением (~25–65 Ки/год), а запас ^{90}Sr , депонированного в речной системе застабилизировался на уровне ~500 Ки. "Режим стабилизации" характеризуется условием, при котором поступление ^{90}Sr в речную систему с ГТС (ЛБК и ПБК) практически полностью компенсируется процессами радиоактивного распада и вымывания (десорбции), а радиоактивный сток ^{90}Sr остается практически постоянным по всей длине реки. При этом удельная активность ^{90}Sr в водах реки в пределах одного календарного года (когда мощность фильтрационного источника можно считать практически постоянной) определяется только расходом воды в реке.

6. Содержание ^{137}Cs , ^{99}Tc и изотопов плутония в воде р. Теча значительно (10–1000 раз)

меньше установленных санитарных нормативов (уровня вмешательства по НРБ-99) и не представляет реальной радиационной опасности. Основным источником поступления этих радионуклидов в воды реки является процесс взмучивания (водной эрозии) донных отложений в районе Асановских болот.

7. Содержание трития в воде р. Теча в 10–100 раз меньше уровня вмешательства по НРБ-99. Поступление трития в р. Теча определяется объемом фильтрационных потерь из водоемов ТКВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Садовников В.И., Глаголенко Ю.В., Дрожко Е.Г., Мокров Ю.Г. Современное состояние и пути решения проблем Теченского каскада водоемов // Вопросы радиационной безопасности. – 2002. – № 1. – С. 3–14.
2. Мокров Ю.Г. Анализ прогноза стока стронция-90 с водами р. Теча // Известия ВУЗов. Ядерная энергетика. 2004. – № 4. – С. 43–49.
3. Sources contributing to Radioactive contamination of the Techa River and areas surrounding the "Mayak" production association, Urals, Russia. Joint Norwegian – Russian Expert Group, S.V. Malyshev, S.M. Vakulovsky, E.G. Drozhko, G.N. Romanov, Y.V. Glagolenko, Yu.G. Mokrov, E.A. Westerlund, I. Amundsen, P. Strand, B. Salbu, D.H. Oughton, G.C. Christensen, T.S. Bergan, Osteras, October 1997. – 134 p.
4. Мокров Ю.Г. Оценка текущего запаса и прогноз стока цезия-137, плутония-239, 240 и технеция-99 с водами р. Теча // Геоэкология. – 2005. – № 6. – С. 517–526.
5. Мокров Ю.Г., Антонова Т.А. Оценка параметров источника фильтрационного поступления стронция-90 из Теченского каскада водоемов в правобережный канал // Вопросы радиационной безопасности. – 2000. – № 4. – С. 17–30.
6. Гедеонов Л.И., Виноградова В.К., Гритченко З.Г. и др. Радиоактивное загрязнение речной системы Теча – Исеть – Тобол – Иртыш – Обь: Препринт // НПО "Радиовый институт им. В.Г. Хлопина", Санкт-Петербург, 1998, РИ-251. – 62 с.
7. Говорун А.П., Урецкоев Л.И., Щербак С.Б. и др. Применение полевой радиометрии для картографирования загрязнения цезием-137 поймы р. Теча // Труды конференции "Радиоактивность при ядерных взрывах и авариях". Москва 24–26 апреля 2000 г. – С. 438–443. – СПб.: Гидрометеиздат, 2000. – 786 с.
8. Колосов И.А. Изучение самоочищения рек, загрязненных долгоживущими радиоактивными изотопами: Дисс... на соискание уч. степени канд. техн. наук / Институт прикладной геофизики. – М., 1968. – 226 с.
9. Медико-биологические и экологические последствия радиоактивного загрязнения р. Теча / Под ред. А.В. Аклеева, М.Ф. Киселева. – М., 2001. – 531 с.
10. Говорун А.П., Чесноков А.В., Щербак С.Б. Распределение запаса Cs-137 в пойме р. Теча в районе с. Муслюмово // Атомная энергия. – 1998. – Т. 84, вып. 6. – С. 545–550.
11. Говорун А.П., Чесноков А.В., Щербак С.Б. Особенности распределения Cs-137 и Sr-90 в пойме р. Теча в районе пос. Бродокалмака // Атомная энергия. – 1999. – Т. 86, вып. 1. – С. 63–68.
12. Трапезников А.В., Позолотина В.Н., Молчанова И.В. и др. Радиоэкологическая характеристика речной системы Теча – Исеть // Экология. – 2000. – № 4. – С. 248–256.
13. Trapeznikov A.V., Pozolotina V.N., Chebotina M.Ya. et al. Radioactive contamination of the Techa river, the Urals // Health Physics. – 1993. – V. 65. – № 5. – P. 481–488.