

УДК 574.58;577.346

Л.Н. Михайловская, И.В. Молчанова, Е.Н. Караваева, А.В. Трапезников, В.Н. Трапезникова

Институт экологии растений и животных УрО РАН

620144, Россия, г. Екатеринбург, ул. 8-го Марта, 202

Тел.: 8(34377)32070; факс: 8(34377)32070; E-mail: molchanova_i_v@mail.ruМИГРАЦИЯ ДОЛГОЖИВУЩИХ РАДИОНУКЛИДОВ С РЕЧНЫМ СТОКОМ
(на примере р. Теча на Урале)

Изучена миграция радионуклидов со стоком р. Теча, (правобережный приток р. Исети), загрязненной в течение 1949-1956 гг. радиоактивными отходами производственного объединения «Маяк» на Урале. Показано, что более 90% ^{90}Sr мигрирует в составе жидкой, а ^{137}Cs и $^{239,240}\text{Pu}$ – твердой компоненты стока. За год через устье р. Теча перемещается и поступает в открытую гидрографическую сеть около $2 \cdot 10^{12}$ Бк ^{90}Sr , $0,1 \cdot 10^{12}$ Бк ^{137}Cs и $0,6 \cdot 10^8$ Бк $^{239,240}\text{Pu}$. При этом примерно 50% от годового стока ^{90}Sr и более 90% ^{137}Cs и $^{239,240}\text{Pu}$ выносятся в период половодья с максимальным расходом воды, продолжающегося 5-10 дней.

В XX веке в результате научно-технического прогресса, межгосударственных политических противостояний и войн человечество создало мощные потоки техногенных элементов и радионуклидов в биосфере. Масштабные испытания ядерного оружия загрязнили биосферу Земли в глобальном масштабе, а эксплуатация многочисленных атомно-энергетических объектов, в штатном режиме и особенно аварийные ситуации сформировали радионуклидный прессинг в отдельных регионах страны. Так, в первые годы деятельности производственного объединения «Маяк» на Урале (1949-1956 гг.) радиоактивные отходы без очистки и нормирования сбрасывались в р. Течу, (правобережный приток р. Исети). В силу своих структурно-функциональных особенностей природные экосистемы перераспределяют радиоактивные вещества по составляющим их компонентам. В итоге вода, донные отложения, биота и пойменные ландшафты этой реки оказались загрязненными долгоживущими радионуклидами в различной степени. Более половины века радиоэкологическая ситуация в регионе остается напряженной, а сама загрязненная пойменно-речная экосистема сохраняет статус «горячей точки», привлекающей внимание специалистов разного профиля. В результате многолетних комплексных исследований описаны сопряженные процессы миграции долгоживущих радионуклидов ^{90}Sr и ^{137}Cs в реке и ее пойме. Оценены их запасы в донных отложениях и почвах, сформированных вдоль по течению реки, и по ширине за-

топленных участков [3, 6-8, 11, 13, 14, 16, 17]. По ряду объективных причин очень мало исследований было посвящено изучению закономерностей поведения на загрязненной территории плутония [3;5,13]. Поведение техногенных радионуклидов в пойменно-речной экосистеме подчиняется общим геохимическим законам и в значительной степени определяется свойствами самих элементов, особенностями пойменного почвообразования, характером речного стока. Периодическое затопление почв или их длительное переувлажнение, смена щелочно-кислотных и окислительно-восстановительных условий среды влияют на подвижность ряда химических элементов. В результате поймы рек и особенно отдельные их участки исполняют роль геохимических барьеров, на которых имеет место аккумуляция макро и микроэлементов, а также радионуклидов. Все это превращает пойменные участки ландшафтов в потенциальные источники вторичного загрязнения речных экосистем [10,12]. Перемещение радионуклидов с речным стоком происходит как в форме водорастворимых соединений, так и в составе механически переносимого аллювиального материала, тонкодисперсных суспензий и коллоидных агрегатов. Соотношение этих форм переноса определяет поступление радионуклидов в сопряженные звенья гидрографической сети.

Цель настоящей работы состояла в оценке параметров миграции долгоживущих техногенных радионуклидов ^{90}Sr , ^{137}Cs и $^{239,240}\text{Pu}$ с компонентами стока реки Течи в разные сезоны года.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Река Теча берет начало в оз. Иртяш (Каслинский район Челябинской области) и впадает в р. Исеть на территории Курганской области. Её протяжённость составляет 243 км, площадь водосбора – 7600 км², средний годовой расход воды в устье – 7.6 м³/с [9]. Половодье происходит обычно в апреле-мае, при этом максимальные расходы воды в устье достигают 290-460 м³/с, а минимальные - в меженный период удерживаются на уровне 0.2-0.7 м³/с. По оценкам разных исследователей в донных

отложениях и пойме р. Теча интегральные запасы ^{90}Sr составляют $(106-333) \cdot 10^{12}\text{Бк}$, ^{137}Cs - $(348-388) \cdot 10^{12}\text{Бк}$ и $^{239,240}\text{Pu}$ - $0.8 \cdot 10^{12}\text{Бк}$ [3, 11].

Исследования проводили в 2004 г. в двух створах, расположенных на участке сред-

него течения и в устье реки Течи, в районе н.п. Бродокалмак и н.п. Затеченское соответственно (рис.1).



Рис. 1. Схема района исследований

В период весеннего половодья и летней межени определяли основные параметры речного стока: скорость течения, расход воды и твердого стока. Для исследований отбирали большеобъемные пробы воды, из которых фильтрованием через фильтр «белая лента» отделяли взвешенные частицы твердого стока. Выделенные частицы высушивали, взвешивали, а воду выпаривали. Одновременно отбирали пробы донных отложений и прирусловых почв, слой 0-5 см.

Во всех случаях пробы почв, донных отложений, сухой остаток воды и материалы твердого стока озоляли при $t = 450^\circ\text{C}$. Содержание изотопов плутония в пробах определяли радиохимическим методом, включающим их выделение на ионообменной смоле, электролитическое осаждение на дисках, изготовленных из нержавеющей стали. Измерение проводили на альфа-спектрометре типа Alpha Analyst фирмы «Canberra Packard» (США) с полупроводниковыми детекторами (PIPS), программным обеспечением GENIE-2000 и пределом обнаружения 0.001 Бк. Полное описание методики приведено в работе [15]. Содержание ^{90}Sr в образцах определяли радиохимическим методом по дочернему ^{90}Y . Для радиометрии

подготовленных препаратов использовали малофоновую установку УМФ-2000 или спектрометрический комплекс «Прогресс» с программным обеспечением «Прогресс-2000». Определение ^{137}Cs в пробах проводили спектрометрическим методом на многоканальном гамма-анализаторе с германиевым полупроводниковым детектором фирмы «Canberra Packard» (США) или спектрометрическом комплексе «Прогресс» со сцинтилляционным детектором NaI. Статистическая ошибка измерений не превышала 15 %, предел обнаружения ^{90}Sr и ^{137}Cs составлял 0.1 Бк.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Характеризуя сток р. Течи отметим, что в разные сезоны года расход воды в устье в 1.5 раза выше, чем в среднем течении (табл.1). Максимальная величина твердого стока (на порядок выше, чем в среднем течении реки) наблюдалась в устьевом створе в период половодья. В меженный период эти различия сглаживаются. В целом весовой вклад твердой компоненты в общий сток реки невелик: в устье в половодье он составляет 0.03%, а в остальных случаях не превышает 0.004%.

Таблица 1 - Характеристика стока р. Теча

Период	Компонента стока			
	Жидкая, м ³ /сек		Твердая, кг/сек	
	Среднее течение	Устье	Среднее течение	Устье
Половодье	238.0	367.0	10.7	123.7
Межень	0.96	1.35	0.01	0.02

В половодье удельная активность ⁹⁰Sr в жидкой компоненте стока р. Теча составляла 3.75-5.1 Бк/кг, а в меженный период повышалась примерно в 5-8 раз (табл. 2).

Таблица 2 - Удельная активность радионуклидов в компонентах речного стока, Бк/кг

Радионуклид	Компонента стока	Среднее течение		Устье	
		Половодье	Межень	Половодье	Межень
⁹⁰ Sr	Жидкая	5.10±0.26	39.60±6.20	3.75±0.23	18.30±2.30
	твердая	1436±442	11290±1630	750±67	4325±308
¹³⁷ Cs	Жидкая	0.17±0.03	0.17±0.03	0.07±0.01	0.09±0.06
	Твердая	12380±331	8207±2010	970±74	378±32
^{239,240} Pu	Жидкая	0.0004±	0.0003±	0.0002±	0.0001±
		0.0001	0.0001	0.0001	0.00005
	твердая	15.6±6.2	19.59±5.50	2.80±0.36	3.33±3.00

В то же время, как следует из таблицы 1, в обоих створах объем воды в межень снижается примерно в 250 раз. Такой диспропорционизм между изменением расхода воды и содержанием в ней ⁹⁰Sr, может быть вызван дополнительным поступлением его в период паводка. Ранее было показано, что одним из источников дополнительного поступления ⁹⁰Sr в воды реки является сезонный поверхностный и внутриводный сток [3;4]. Удельная активность ¹³⁷Cs и ^{239,240}Pu в жидкой компоненте стока не зависела от периода исследований, но снижалась в устье реки пропорционально изменению объема стока. Привлекает внимание тот факт, что в частицах твердого стока удельная активность ⁹⁰Sr в 200-300 раз, а ¹³⁷Cs и ^{239,240}Pu на 3-4 порядка выше, чем в жидкой фазе.

Взвешенный материал, обогащенный радионуклидами, вовлекается в процессы почвообразования и формирования донных отложений. Особенно интенсивное накопление его в поймах и руслах рек приурочено к периодам паводков. Представляло интерес выявить взаимосвязь радионуклидного загрязнения твердой составляющей стока с одной стороны и донных отложений и прирусловых почв, с другой стороны. Для этого было определено содержание радионуклидов в образцах донных отложений и прирусловых почв, отобранных в период половодья на участках среднего тече-

ния реки и в устье (табл. 3). Для сравнения в этой же таблице приведены величины удельной активности твердой компоненты речного стока. Анализ приведенных данных выявил близкое совпадение содержания ⁹⁰Sr в исследованных образцах в пределах каждого из изученных участков реки. При этом наблюдается синхронное снижение его содержания в трех типах образований вниз по течению реки. Все это свидетельствует о тесной генетической связи ⁹⁰Sr аккумулярованного почвами и донными отложениями с его содержанием во взвешенном материале речного стока. Для ¹³⁷Cs и ^{239,240}Pu эта взаимосвязь выражена в меньшей степени. Содержание этих радионуклидов в твердой компоненте стока в 1,5-5,0 раз выше, чем в почвах и донных отложениях. Кроме того, имеет место резкое падение градиента удельной активности радионуклидов, особенно ¹³⁷Cs, в исследуемых компонентах вниз по течению реки. Все это является отражением сочетанного действия различных гидрологических и экологических факторов, определяющих миграционные процессы в пойменно-речной экосистеме. Можно предположить, что подвижный мелкодисперсный материал (коллоидные частицы), наиболее обогащенный ¹³⁷Cs и ^{239,240}Pu, удерживается во взвешенном состоянии длительное время и поступает с жидким стоком реки в открытую гидрографическую сеть.

Таблица 3 - Удельная активность радионуклидов в 0-5 см слое почв и донных отложений в период половодья, Бк/кг

Участок реки	Образец	Бк/кг		
		⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	^{239,240} Pu
Среднее течение	Твердый сток	1436±442	12380±331	15.6±6,2
	Донные отложения	1500±654	4870±1310	4.6±0,1
	Почва	1450±470	7832±784	10.3±3,6
Устье	Твердый сток	750±67	970±74	2.8±0,4
	Донные отложения	518±181	194±55	0.7±0,3
	Почва	756±420	280±38	0.9±0,3

Зная удельную активность радионуклидов в компонентах стока и скорость течения реки в двух обследованных створах, рассчитали количества излучателей, проходящие через них в единицу времени (рис.2). При таком выражении результаты отмеченные ранее различия в объемах стока и удельных активностях его компонентов нивелируются. Количества радионуклидов, перемещающихся на

разных участках реки в единицу времени, оказались примерно одинаковыми. Для всех изученных радионуклидов максимальный перенос с компонентами стока наблюдается в период паводка; в летнюю межень он снижается на 2-3 порядка величин. Видно, что перенос ⁹⁰Sr преимущественно осуществляется в форме водорастворимых соединений, а ¹³⁷Cs и ^{239,240}Pu – в составе твердого стока.

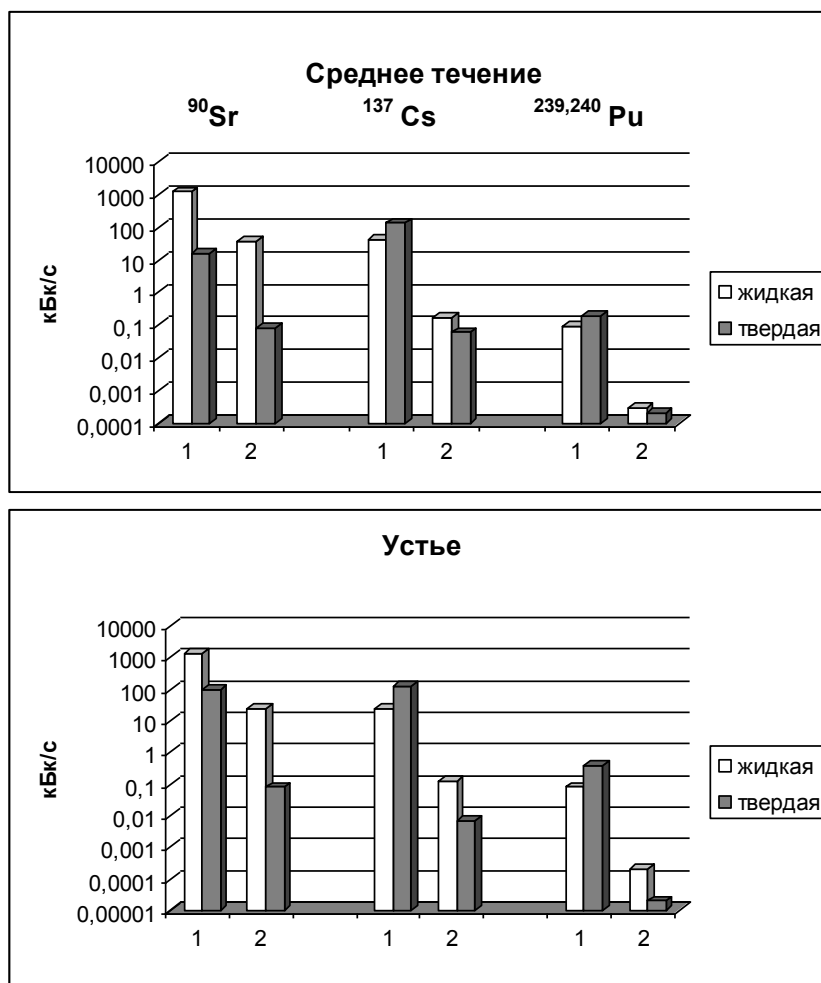


Рис. 2. Миграция радионуклидов с компонентами речного стока: 1 – половодье; 2 – межень.

Отмеченные особенности наиболее отчетливо проявляются при выражении данных в относительных единицах. Поскольку, как отмечалось выше, для двух створов реки получены совпадающие результаты на рис. 3 представлено процентное распределение радионуклидов по компонентам речного стока устьевого створа. Действительно, более 90% ^{90}Sr мигрирует в составе жидкой компоненты стока независимо от сезона года. В период половодья основное количество ^{137}Cs и $^{239,240}\text{Pu}$ (около

80%) перемещается с материалами твердого стока. В межень, спад воды и очищение от взвесей, сопровождается снижением вклада твердой компоненты стока в миграцию этих радионуклидов. Следует подчеркнуть, что, несмотря на малую весовую долю твердой компоненты в общем объеме стока, именно она определяет величину миграционного потока ^{137}Cs и $^{239,240}\text{Pu}$ в реке в период половодья, а в межень ее вклад составляет 5-40%.

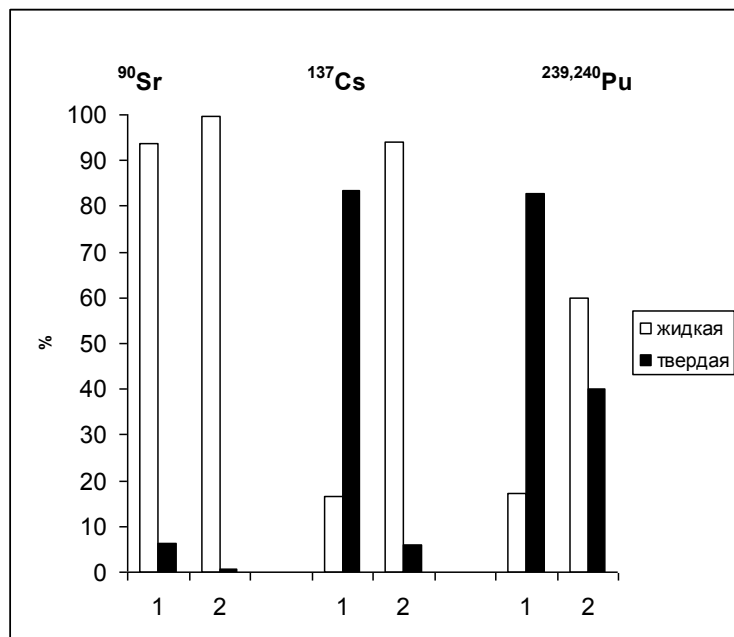


Рис. 3. Распределение радионуклидов по компонентам речного стока в устье реки; 1 – половодье; 2 – межень.

Используя имеющиеся характеристики стока р. Течи, провели приближенную оценку количества радионуклидов, перемещающиеся с потоком воды за год. При расчетах на основании гидрологических характеристик р. Течи предположили, что период половодья с максимальным расходом воды может продолжаться 5-10 дней [9]. Результаты расчетов показали, что через каждый створ реки Течи за год перемещается примерно одинаковое количество радионуклидов, около $2 \cdot 10^{12}$ Бк ^{90}Sr , $0.1 \cdot 10^{12}$

Бк ^{137}Cs и $0.6 \cdot 10^8$ Бк $^{239,240}\text{Pu}$. Достаточно высокий уровень содержания радионуклидов в речном стоке дает основание считать, что основным источником его загрязнения остаются расположенные в истоке реки Асановские болота [2,3]. Отметим, что в короткий период половодья с максимальным расходом воды (5-10 дней) переносится примерно 50% ^{90}Sr и более 90% ^{137}Cs и $^{239,240}\text{Pu}$ в расчете от их годового стока (рис. 4).

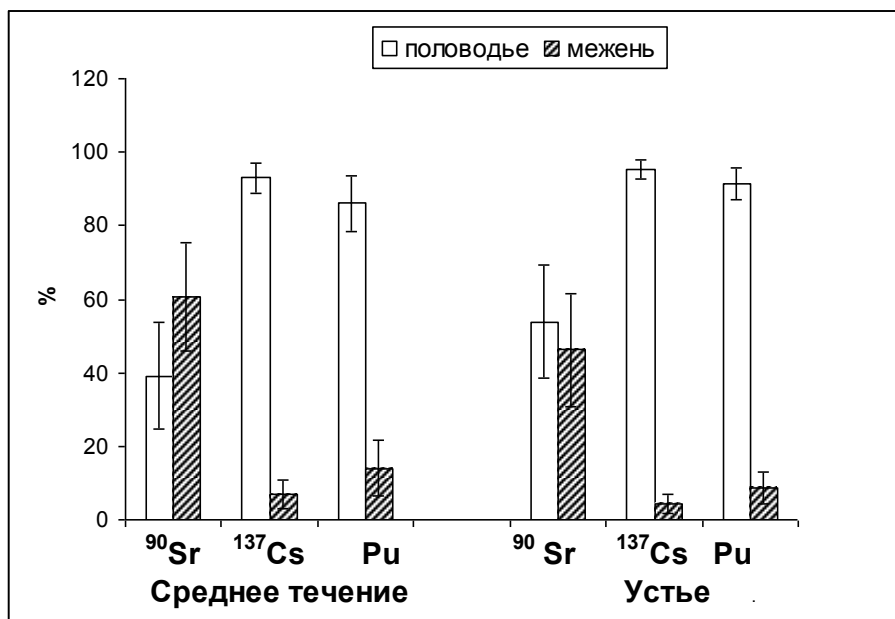


Рис. 4. Годовой сток радионуклидов

Выводы

1. Исследования, проведенные в двух створах реки Теча показали, что объем стока в половодье составлял 238-367 м³/с, а в межень в 250 раз меньше. Доля твердой компоненты не превышала 0.03% от общего объема стока.

2. Удельная активность ⁹⁰Sr в жидкой компоненте стока р. Теча в половодье составляла 3.75-5.1 Бк/кг, а в меженный период повышалась примерно в 5-8 раз. Диспропорционизм между изменением расхода воды и содержанием в ней ⁹⁰Sr свидетельствует о наличии дополнительного поступления этого радионуклида в реку в период половодья. Удельная активность ¹³⁷Cs и ^{239,240}Pu в жидкой компоненте стока не зависела от периода исследований, но снижалась в устье реки согласно «эффекту разбавления»: пропорционально изменению объема стока.

3. Показано, что ⁹⁰Sr мигрирует преимущественно в водорастворимом состоянии, в то время как основное количество ¹³⁷Cs и ^{239,240}Pu включено в состав частиц твердого стока.

4. За год вниз по течению р. Теча перемещается около $2 \cdot 10^{12}$ Бк ⁹⁰Sr, $0.1 \cdot 10^{12}$ Бк ¹³⁷Cs и $0.6 \cdot 10^8$ Бк ^{239,240}Pu. В период половодья с максимальным расходом воды, продолжающийся 5-10 дней из р. Течи выносится примерно 50% от годового стока ⁹⁰Sr и более 90% ¹³⁷Cs и ^{239,240}Pu

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта МНТЦ № 2841 и гранта РФФИ 07-05-00171а.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковда В.А. Основы учения о почвах. Москва. Наука, 1973. Т.2, 467 с.
2. Мартюшов В.В., Спиринов Д.А., Базылев В.В. и др. Радиоэкологические аспекты поведения долгоживущих радионуклидов в пойменных ландшафтах верхнего течения реки Течи // Экология. 1997. №5. С.361-368
3. Медико-биологические и экологические последствия радиоактивного загрязнения реки Теча / Под ред. А.В. Аклеева, М.Ф. Киселева – Москва. Изд-во ГУП Вторая типография ФУ «Медбиоэкстрем». 2001. 534 с.
4. Михайловская Л.Н., Молчанова И.В., Позолотина В.Н., Караваева Е.Н. Экспериментальная оценка водной миграции радионуклидов в почвах поймы р. Течи // Почвоведение. 2002. №9. С. 1129-1133.
5. Михайловская Л.Н., Молчанова И.В., Караваева Е.Н. Поведение плутония в пойменных почвах // Дефектоскопия. 2005. №1. С. 74-79.
6. Молчанова И.В., Караваева Е.Н., Михайловская Л.Н., Позолотина В.Н., Лобанова Л.В. Барьерно-регулирующая роль пойменных почв в миграции радионуклидов (на примере речной системы Теча-Исеть) // Экология. 2003. №4. С. 267-273.

7. Молчанова И.В., Караваева Е.Н., Михайловская Л.Н., Позолотина В.Н., Лобанова Л.В. Радиологическая ситуация в районах населенных пунктов береговой зоны р. Теча // Радиэкология. 2004. Т.44. №5. С.603-607.
8. Последствия техногенного радиационного воздействия и проблемы реабилитации Уральского региона/ Под общей ред. С.К. Шойгу. Москва. Комтехпринт. 2002. 287 с.
9. Ресурсы поверхностных вод. Т.11. Ленинград. Гидрометеиздат, 1973. 848 с.
10. Тимофеев-Ресовский Н.В. Некоторые проблемы радиационной биогеоценологии. Докл....докт. биол. наук. Свердловск: Ин-т биол. УФАН СССР. 1962. 53 с.
11. Трапезников А.В., Позолотина В.Н., Юшков П.И., Трапезникова В.Н., Молчанова И.В., Караваева Е.Н., Чеботина М.Я., Ааркрос А., Дальгаард Х., Нильсен С.П., Чен К. Исследования радиологической ситуации в реках Теча и Исеть, загрязненных сбросами ПО «МАЯК» // Проблемы радиэкологии и пограничных дисциплин. Заречный. Изд-во УГТУ, 1999. С. 20-66.
12. Тюрюканов А.Н. Ландшафтно-геохимические барьеры и их роль в миграции химических элементов в географической оболочке Земли // Изв. всесоюз. географ. об-ва. 1964. №4. С.306-312.
13. Aarkrog A., Trapeznikov A.V., Molchanova I.V. et al. Environmental modeling of radioactive contamination of floodplains and sorklakes along the Techa and Iset rivers// J. Environ. Radioactivity. 2000.V.49. P. 243-257.
14. Chesnokov A.V., Govorun A.P., Linnik V.G., Shcherbak S.B. Cs-137 contamination of Techa flood plain near village Muslumovo// Proc. Of Symposium on Radiation Measurements and Applications. 12-14 May 1998. Michigan, USA. 1998. P.72-75.
15. Qingjiang Chen, Aarkrog A., Nielsen S. P., Dahlgard H., Nies H., Yixuan Yu., Mandrup K. Determination of plutonium in environmental samples by controlled valence in anion exchange. /J. Radioanalyt. Nuclear Chem. 1993. V.172. N 2. P. 281-288
16. Sources contributing to radioactive contamination of the Techa River and areas surrounding the "Mayak" production association, Urals, Russia. Joint Norwegian – Russian Expert Group for Investigation of Radioactive Contamination in the Northern Areas// Ostersas. 1997. 134 p.
17. UNSCEAR. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. – New York: United Nations, 1988. – 428 p.

MIGRATION OF THE LONG-LIVING RADIONUCLIDES WITH THE RIVER OUTFLOW (WITH SPECIAL REFERENCE TO THE TECHA RIVER IN THE URALS)

L.N. Mikhailovskaya, I.V. Molchanova, E.N. Karavaeva, A.V. Trapeznikov, V.N. Trapeznikova

Migration of radionuclides with the Techa river (the right tributary of the Iset river) outflow have been investigated. The Techa river was contaminated during 1949-1956 years with the liquid nuclear waste discharged from enterprise "MAYAK". It was shown that more than 90% of ^{90}Sr migrated with the liquid component of the outflow, however the main quantity of ^{137}Cs and $^{239,240}\text{Pu}$ migrated with the solid one. For one year through the mouth of the Techa river about 2×10^{12} Bq of ^{90}Sr , 0.1×10^{12} Bq of ^{137}Cs and 0.6×10^8 Bq of $^{239,240}\text{Pu}$ move and enter into an open hydrographic network. Thus approximately 50% of an annual outflow of ^{90}Sr and more than 90% of ^{137}Cs and of $^{239,240}\text{Pu}$ run out with a peak discharge of the high water lasting 5-10 days.