

Техногенные радионуклиды в экосистеме Нижней Томи

Леонова Г.А. (leonova@uiggm.nsc.ru) (1),

Торопов А.В. (2), Бобров В.А. (1), Маликов Ю.И. (1)

(1) Объединенный институт геологии, геофизики и минералогии Сибирского
отделения Российской академии наук, пр. ак. Коптюга, 3, Новосибирск, 630090

(2) Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, Томск, 634050

Введение

Во второй половине XX века речные системы Оби и Енисея подвергались техногенному радиоактивному загрязнению за счет надземных испытаний атомного оружия, аварийных и технологических сбросов радиоактивных отходов от атомных предприятий по производству плутония: «Маяк» (Челябинск - 65), Сибирский химический комбинат (СХК, г. Северск Томской области) и Красноярский горно-химический комбинат (КГХК, г. Железногорск). В настоящее время одной из наиболее важных проблем Обь-Иртышского бассейна является анализ возможных последствий попадания радионуклидов в гидросферу с водосборных площадей и из водоемов-отстойников, которые используются для хранения жидких слабоактивных радиоактивных отходов. Так, в донных осадках устьевой части Томи и среднем течении Оби (ниже СХК) фиксируются концентрации техногенных радионуклидов, превышающих уровень глобальных выпадений в этом районе [1]. Содержание ^{137}Cs в донных отложениях реки Исеть в месте впадения ее в р. Тобол составляет около 2 кБк/м², что говорит о том, что перенос радионуклидов по водной системе Исеть - Тобол - Иртыш - Обь будет происходить еще длительное время [2]. В донных отложениях эстуария Оби, согласно данным Д.Г. Матишова и др. [3], спектр и количество нуклидов отражает явное влияние радиоактивных заводских сливов. Об

этом свидетельствуют аномальные величины запасов плутония, кобальта и стронция в донных осадках на акватории Обской губы.

Изучение радиоактивности донных осадков Томи, выше и ниже сбросов СХК, а также Оби проводилось нами ранее в плане систематического изучения последствий испытаний Семипалатинского полигона на территориях Новосибирской, Кемеровской, Томской областей и Алтайского края [4-13]. В предлагаемой публикации представлен фактический материал по радиоактивному загрязнению компонентов речной системы Томи в ближней зоне влияния СХК за пределами санитарно-защитной зоны. Специальный отбор водной биоты (водоросли, макрофиты, рыбы) выявил специфический спектр короткоживущих техногенных радионуклидов, отличный от спектра радионуклидов в речных донных отложениях, что свидетельствует о высокой эффективности захвата живым веществом наиболее подвижных в водной среде техногенных гамма-излучающих радионуклидов (^{239}Np , ^{24}Na , ^{76}As и др.). Полученные фактические данные могут быть использованы при выполнении систематических исследований закономерностей распределения и миграции радионуклидов в экосистемах рек Томи и Оби, подобно проведенным исследованиям в долине реки Енисей [14].

Сибирский химический комбинат является одним из крупнейших комплексов предприятий ядерно-топливного цикла (ЯТЦ) и расположен в непосредственной близости от г. Томска. СХК функционирует более 40 лет, и до недавнего прошлого его деятельность проходила в полном режиме секретности. Первые открытые публикации по вопросу радиоактивного загрязнения экосистемы р. Томь от сбросов СХК появились в 1990 г [15]. Позже сведения о присутствии техногенных радионуклидов в различных компонентах природной среды в зоне влияния СХК стали размещаться в ежегодных отчетах Гидрометеослужбы, Центра государственного санэпиднадзора и

природоохранных органов. Поступление широкого спектра техногенных радионуклидов с территории СХК в открытую гидросеть (р. Томь и далее в р. Обь) началось в 1953 г. с момента фактического запуска первого и единственного прямоточного реактора «Иван-1» (И-1). Кроме того, до ввода в 1963 г. площадок глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов, в р. Томь поступали радиоактивные отходы радиохимического, химико-металлургического, сублиматного заводов СХК при переполнении открытых бассейнов и водохранилищ. После остановки в 1990 г. реактора И-1 через технологический канал СХК, более известного как р. Ромашка, в Чернильщиковскую протоку р. Томь сбрасываются сточные воды системы охлаждения стержней управления защиты двуцелевых энергетических реакторов АДЭ-4 и АДЭ-5, а также часть очищенных до сбросных норм низкоактивных отходов другого происхождения [8].

Радиоактивные изотопы, поступающие в водоемы от предприятий ЯТЦ, быстро поглощаются водными организмами и грунтами, в результате чего их содержание в воде резко снижается. Поэтому низкое содержание радионуклидов в воде не всегда свидетельствует о чистоте водоема в целом. Даже при полной пригодности ее для питьевых целей концентрация многих радиоактивных изотопов в растениях, животных и грунтах может поддерживаться на уровне, превышающем их концентрацию в воде на порядки величин [16]. Специфика пресноводных водоемов проявляется в том, что в результате снижения фактора разбавления, концентрации радионуклидов в них возрастает гораздо быстрее, чем в морях и океанах. При этом слабая минерализация воды способствует более высокому накоплению радионуклидов пресноводными гидробионтами по сравнению с морскими [17].

В настоящее время принципиально важно знать современную радиоэкологическую ситуацию в речной системе Обь-Иртышского бассейна и,

особенно в ее биотической составляющей, в том числе рыбе, являющейся одним из ведущих пищевых объектов для населения сел и городов, расположенных вдоль рек. В то же время, в биообъектах ближней зоны влияния СХК техногенные радиоактивные изотопы изучены крайне слабо. Исследование водных биоценозов рек Ромашка и Томь на предмет накопления техногенных радионуклидов в рыбе и макрофитах начаты в 1990-1991 гг. и продолжаются до настоящего времени [12-13, 18]. Радиоэкологический мониторинг рыб рек Тобол и Иртыш проводится с 1995 г. по настоящее время [2].

Объекты и методы исследования

Материалы настоящей публикации получены в двух экспедициях - 2000 и 2002 гг. Изучены особенности распределения и уровни накопления техногенных радионуклидов в воде, донных осадках и гидробионтах ближней зоны влияния СХК (р. Ромашка), реки Томь выше и ниже сброса сточных вод комбината и реки Обь ниже устья Томи. Схема отбора проб в районе исследований представлена на рис.1.

Донные осадки отобраны специальным пробоотборником конструкции Ю.И. Маликова с борта речного катера. Использование такого пробоотборника позволило впервые опробовать донные осадки в районе работ на глубину до 105 см. На 8 станциях из осадочного материала различного литологического состава отобрано 74 пробы. Из поднятых кернов на судне нарезали 5-сантиметровые фрагменты по всей длине колонки и упаковывали их в полиэтиленовые пакеты. В лаборатории определяли естественную плотность осадков и их влажность.

При выборе индикаторных биообъектов радиоактивного загрязнения водной среды предпочтение отдавалось наиболее широко распространенным массовым видам гидробионтов («сквозные» объекты): водные растения - рдест блестящий (*Potamogeton lucens*), хвощ приречный (*Equisetum fluviatile*), осока (*Carex sp.*); нитчатые зеленые

водоросли; рыбы – карась серебряный (*Carassio carassio gibelio*). Зоопланктон в р. Ромашке отобрать не удалось из-за чрезвычайно малой численности зоопланктонных организмов, хотя он считается наиболее информативным тест-объектом для радиоэкологических целей. По-мнению некоторых исследователей [17], в зоне сброса подогретых вод системы охлаждения энергетических реакторов происходит угнетение организмов зоопланктона, что проявляется в снижении его численности и биомассы. В р. Ромашка низкая численность зоопланктона, по-видимому, связана именно с влиянием этих факторов. Образцы водной биоты анализировались как в сыром виде, так в сухом и озоленном состоянии, что обусловлено особенностями использованных видов анализа. Пересчет от золы и сухой массы проб к сырой проводили по пересчетным коэффициентам.

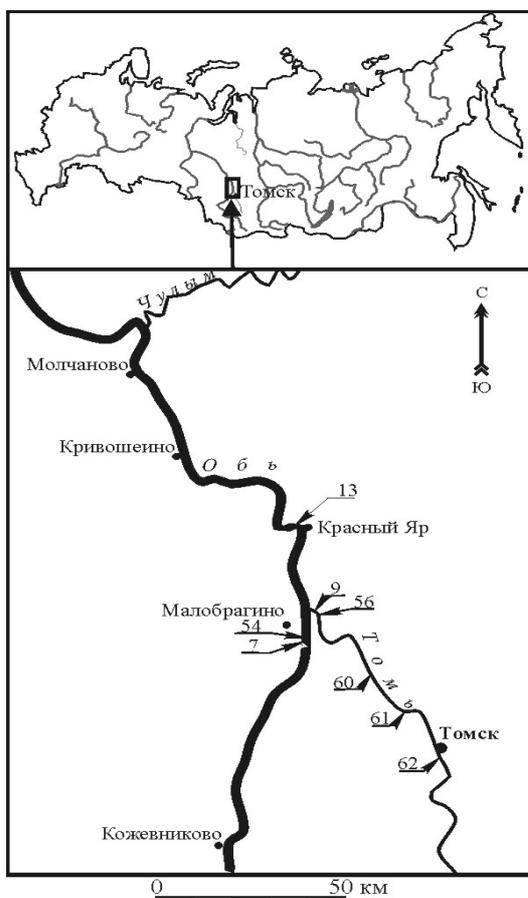


Рис.1. Схема отбора проб в районе исследований.

Гамма-спектрометрический анализ воды и биообъектов производился сразу же после отбора проб в лаборатории отдела радиационной безопасности ОГУ «Облкомприрода» (г. Томск) на гамма-спектрометре «РАДЭК» с ППД ДГДК-100В (замеры проводили Ю.А. Громов, В.Б. Елагин). Кроме того, биообъекты анализировались в Аналитическом центре Объединенного института геологии, геофизики и минералогии (ОИГГМ) СО РАН на базе лаборатории геохимии редких элементов и экогеохимии с использованием комплекса ядерно-физических методов анализа, включающего полупроводниковую γ -, α -спектрометрию и β -радиометрию. Основное внимание уделялось определению и изучению γ -излучающих радионуклидов, которые, как правило, являются основными загрязнителями компонентов природной среды в зоне влияния предприятий ЯТЦ. Применение β -радиометрии (определение ^{90}Sr) и α -спектрометрии (определение изотопов $^{239,240}\text{Pu}$ и ^{238}Pu) было ограничено значительной трудоемкостью анализа, включающего стадию радиохимического выделения с разрушением исходного образца и его высокой стоимостью. Поэтому анализ образцов на ^{90}Sr и изотопы плутония проводился выборочно для ограниченного числа проб после их измерения на γ -излучающие радионуклиды.

Гамма-спектрометрический анализ биообъектов на содержание долгоживущих радионуклидов и короткоживущих с экстраполяцией на время отбора проб проведен ОИГГМ СО РАН на коаксиальном HP Ge полупроводниковом детекторе (ППД) EGPC 20-1.80/SHF 00 30A, производства французской фирмы EURISYS MEASURES (замеры осуществлены В.А. Бобровым). Минимально измеряемая активность для различных радионуклидов составила около 1 Бк/кг.

Содержание ^{90}Sr определяли β -радиометрией с радиохимической подготовкой проб в некоторых зольных образцах биообъектов согласно «Инструкции и

методическим указаниям по оценке радиационной обстановки на загрязненной территории», принятой методической секцией Межведомственной комиссии по радиационному контролю природной среды при Госкомгидромете СССР 17.03.1989 г. Для радиохимической подготовки биологические пробы озоляли при температуре 450° С до полного удаления следов органики. Активность ^{90}Sr измерялась по изотопу ^{90}Y , находящемуся с ним в состоянии радиоактивного равновесия. Чувствительность определения ^{90}Sr составляла не более 0.1 Бк/кг.

Активность изотопов плутония ($^{239,240}\text{Pu}$ и ^{238}Pu) в биообъектах определялась α -спектрометрическим методом после радиохимического выделения, проводимого по методике [18] на одноканальном α -спектрометре 7184 фирмы EURISYS MEASURES (Франция). Чувствительность определения $^{239,240}\text{Pu}$ и ^{238}Pu составляла не менее 0.001 Бк при химическом выходе плутония на стадии радиохимического выделения 25 %, что соответствует значению 0.05 Бк/кг для 20-граммовой навески. Радиохимическая подготовка проб проведена И.В. Макаровой, замеры активности изотопов стронция и плутония осуществлены М.С. Мельгуновым.

Радионуклиды в воде р. Ромашка

Ранее А.В. Тороповым показано [8], что в период наблюдений с 1996 по 2000 гг. в водах нижней Томи в районе устья р. Ромашка присутствовали 18 короткоживущих γ -излучающих радионуклидов ($T_{1/2}$ от 2,58 часов у ^{56}Mn до 284 суток у ^{144}Ce), из них 10 активационной и 8 осколочной природы. Согласно этим данным, в р. Томь поступают радионуклиды активационного происхождения (^{24}Na , ^{42}K , ^{46}Sc , ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{56}Mn , ^{59}Fe , ^{65}Zn , ^{76}As , ^{239}Np) и осколочные радионуклиды (^{82}Br , ^{99}Mo , ^{125}Sb , ^{131}I , ^{133}I , ^{140}La , ^{140}Ba). При этом ^{54}Mn , ^{65}Zn , ^{140}La и ^{140}Ba фиксировались только в месте выпуска сточных вод комбината из водохранилища. Их отсутствие в устье р. Ромашки (активность < 1 Бк/л)

объясняется разбавлением сбросных вод СХК сточными водами ТЭЦ СХК и очистных сооружений г. Северска. Единично в пробах воды отмечено присутствие долгоживущих осколочных ^{125}Sb ($T_{1/2}= 2,77$ лет) и ^{152}Eu ($T_{1/2}=13,6$ лет), а также активационного радионуклида ^{60}Co ($T_{1/2}= 5,27$ лет). В среднем за годы наблюдений 98% активности гамма-излучателей, поступающих в биогидроценоз нижней Томи со сбросами СХК, приходится на ^{24}Na (85%), ^{76}As (6,2%), ^{239}Np (4,5%) и ^{42}K (2,3%). Вклад других гамма-излучающих радионуклидов не более 1% каждого и в сумме около 2% ежегодно.

Радионуклиды в водных растениях р. Ромашка и Нижней Томи

Изучена интенсивность накопления техногенных радионуклидов в наиболее часто встречающихся видах водных растений - рдесте блестящем (*Potamogeton lucens*), хвоще приречном (*Equisetum fluviatile*), осоке (*Carex sp.*) и нитчатых зеленых водорослях. Пробы водной растительности отбирались как в ближней зоне влияния СХК (р. Ромашка), так и в р. Томь выше устья Ромашки (условно-фоновый район) и ниже устья Ромашки. Практически весь перечень радионуклидов, содержащихся в воде охлаждения реактора и поступающей непосредственно в р. Ромашку, зарегистрирован в водных растениях р. Ромашка. Общее число техногенных радионуклидов по данным гамма-спектрометрии – 19. Замеры активности γ -излучающих радионуклидов в рдесте блестящем были проведены сразу же после отбора проб в лаборатории отдела радиационной безопасности ОГУ «Облкомприрода» (г. Томск), поэтому в них обнаружены практически все короткоживущие радионуклиды - ^{24}Na , ^{76}As , ^{99}Mo , ^{103}Ru , ^{131}I , ^{140}La , ^{141}Ce , ^{239}Np (табл.1).

Таблица 1

Содержание радионуклидов в воде (Бк/л) и биологических объектах (Бк/кг сырой массы) р. Ромашка и протоки Чернильщиковой р. Томь, июль 2002 г.

Радионуклид (период полураспада)	Дата отбора проб – дата измерений				
	29.07.02 - 31.07.02	29.07.02 - 08.08.02	29.07.02 - 13.08.02	25.07.02 - 26.07.02	30.07.02 -30.07.02
	Рдест блестящий			Вода	Карась серебряный
²⁴ Na (0.62 дн.)	1008	-	-	271	1164
⁴⁰ K	108	134	130	-	90
⁴² K (0.52 дн.)	-	-	-	-	620
⁴⁶ Sc (83.3 дн.)	60	68	62	-	-
⁵¹ Cr (27.7 дн.)	215	193	227	-	-
⁵⁴ Mn (312.3 дн.)	211	208	208	-	-
⁵⁹ Fe (45.1 дн.)	20	20	20	-	-
⁶⁰ Co (5.27 лет)	143	133	131	-	2
⁶⁵ Zn (244 дн.)	461	508	398	-	2361
⁷⁶ As (1.1 дн.)	2141	-	-	41	37
¹⁰³ Ru (39.4 дн.)	10	13	8	-	-
¹³¹ I (8 дн.)	33	35	-	1	-
¹³³ I (0.8 дн.)	162	-	-	-	-
¹³⁷ Cs (30.2 г.)	-	2	5	-	-
¹⁴⁰ Ba (12.8 дн.)	53	34	45	-	-
¹⁴⁰ La (1.68 дн.)	123	-	-	-	-
¹⁴¹ Ce (35.2 дн.)	-	13	156	-	-
²³⁹ Np (2.35 дн.)	2494	2724	1670	25	31

Примечание. Замеры проведены В.Б. Елагиным и Ю.А. Громовым в отделе радиационного контроля ОГУ «Облкомприроды» Томской области; прочерк означает, что радионуклиды не обнаружены (то же и для других таблиц).

Кроме того, образцы водных растений в кратчайшие сроки доставлялись в АЦ ОИГГМ СО РАН, где также проводились замеры активности γ -излучающих радионуклидов. Полученные результаты показывают, что наиболее интенсивно водные растения накапливают ²³⁹Np, ⁷⁶As, ²⁴Na, а зеленые водоросли еще и ⁵¹Cr (табл. 2).

Таблица 2

Содержание техногенных радионуклидов в водных растениях (Бк/кг сырой массы) р. Ромашка и протоки Чернильщиковой р. Томь, июль 2002 г.

Радионуклид	Дата отбора проб (25.07.02.) – дата измерений (27.07.02.)			
	Нитчатые водоросли	Осока	Хвощ приречный	Рдест блестящий
²⁴ Na	410	130	415	-
⁴⁶ Sc	1320	90	300	400
⁵¹ Cr	8000	850	1600	2000
⁵⁴ Mn	343	180	417	1000
⁶⁰ Co	670	200	340	800
⁶⁵ Zn	2850	360	650	3500
⁷⁶ As	11600	1050	3500	7000
¹⁴⁰ La	97	-	96	-
⁵⁹ Fe	350	-	98	100
²³⁹ Np	6600	900	1700	1800

Примечание. Анализы выполнены в Аналитическом центре ОИГГМ СО РАН (замеры - В.А. Бобров).

При сравнении радионуклидного состава «сквозного» растения рдеста блестящего, отобранного в р. Томь в зоне влияния СХК и в зоне влияния Красноярского горно-химического комбината р. Енисей по данным [14], установлено, что спектры короткоживущих техногенных радионуклидов в водных растениях схожи (табл. 3) и свидетельствуют о присутствии их в сточных водах обоих предприятий.

Таблица 3
Сравнительный радиоактивный состав водных растений р. Томь (Бк/кг сырой массы) и р. Енисей (Бк/кг сухой массы) [16] в зоне влияния предприятий ядерно-топливного цикла

Радионуклид	<i>Potamogeton lucens</i> (р. Томь, пр. Чернильщикова), 2002г.	<i>Potamogeton lucens</i> (р. Енисей у с. Атаманово), 2001 г. по [14]
²⁴ Na	1008	2000
⁴⁶ Sc	60	33
⁵¹ Cr	215	690
⁵⁴ Mn	211	20
⁵⁹ Fe	20	20
⁶⁰ Co	143	180
⁶⁵ Zn	461	190
⁷⁶ As	2141	440
¹⁰³ Ru	10	5
¹³¹ I	33	5
¹³³ I	162	-
¹³⁷ Cs	5	23
¹⁴⁰ Ba	53	-
¹⁴⁰ La	123	25
¹⁴¹ Ce	13	16
²³⁹ Np	1700	370

Радиохимический анализ водных растений р. Ромашка показал, что в них обнаружен ⁹⁰Sr и изотопы плутония (^{239,240}Pu, ²³⁸Pu). Максимальная удельная активность ⁹⁰Sr (около 47 Бк/кг) отмечена в рдесте блестящем (табл. 4). Ниже по течению в рдестах р. Томи удельная активность ⁹⁰Sr снижается до 9 Бк/кг.

Таблица 4
Содержание ⁹⁰Sr в водных растениях технологического канала СХК (р. Ромашка) и р. Томь, июль 2002 г.

Место отбора проб	⁹⁰ Sr (Бк/кг сухой массы)
<i>Potamogeton lucens</i> (Рдест блестящий)	
р. Ромашка (вблизи выпуска соков СХК)	33.7
р. Ромашка (устье)	47.4
р. Томь (пр. Чернильщикова)	10.6
р. Томь (условно-фоновый район)	12.5
Зеленые нитчатые водоросли	
р. Ромашка (устье)	10.1

Примечание. Анализы выполнены в Аналитическом центре ОИГТМ СО РАН (радиохимическая подготовка проб - И.В. Макарова, замеры - М.С. Мельгунов, то же и для табл. 5)

Радиохимическими исследованиями установлено высокое содержание изотопов $^{239,240}\text{Pu}$ (335 ± 25 Бк/кг сухой массы) в рдесте блестящем из р. Ромашка вблизи выпуска сбросных вод охлаждения энергетических реакторов. Для сравнения содержание $^{239,240}\text{Pu}$ в рдесте условно-фонового участка р. Томь выше устья Ромашки значительно ниже - 1.2 ± 0.12 Бк/кг (табл.5).

Таблица 5

Содержание радиоизотопов плутония в водных растениях р. Ромашка и р. Томь, июль 2002 г.

Место отбора проб	$^{239,240}\text{Pu}$ (Бк/кг сухой массы)	^{238}Pu (Бк/кг сухой массы)
<i>Potamogeton lucens</i> (Рдест блестящий)		
р. Ромашка (вблизи выпуска стоков СХК)	335 ± 25	4.9 ± 0.5
р. Томь (условно-фоновый район)	1.2 ± 0.12	0.11 ± 0.05
р. Томь ниже устья р. Ромашка	2.47 ± 0.25	0.25 ± 0.12

По нашему предположению, такое высокое содержание изотопов плутония скорее всего обусловлено присутствием в проанализированной растительной пробе «горячей частицы», которая, по всей вероятности, могла «прилипнуть» к растениям при прохождении через их массу сбросных вод комбината. «Горячие частицы» представляют собой высокоактивные (сотни и тысячи беккерелей на килограмм) тонкодисперсные элементы, которые поступают в грунты и донную биоту водоемов вследствие эмиссии с атомных баз и мест захоронения радиоактивных отходов. Топливные «горячие частицы» отмечаются только в ближней зоне действия предприятий ядерно-топливного цикла. Экстремальная радиоактивность грунтов, придонной растительности и донных организмов в указанных зонах определяется присутствием $^{239,240}\text{Pu}$, ^{137}Cs , ^{60}Co в «горячих частицах» [3]. Наличие «горячих частиц» в донных отложениях р. Енисей в зоне влияния Красноярского ГХК отмечается в работах [19, 20].

Радионуклиды в рыбах р. Ромашка и Нижней Томи

Рыба является одним из ведущих пищевых объектов для населения сел и городов, расположенных вдоль рек, а, следовательно, одним из наиболее значимых путей поступления радионуклидов по пищевой цепочке в организм человека. На миграцию долгоживущих радионуклидов (^{90}Sr , ^{137}Cs) по пищевой цепи оказывает решающее значение их биологическая доступность. Так, согласно исследованиям Бакунова Н.А и др. [21], концентрации ^{90}Sr в костях рыб озер полуострова Таймыр зависит от минерализации воды. Чем ниже содержание в воде кальция - химического аналога ^{90}Sr - тем выше накопление ^{90}Sr в кормовых объектах рыб и костях рыб разных трофических уровней. В работе [22] показано, что содержание ^{137}Cs в рыбах из разных озер Финляндии обратно пропорционально содержанию калия в воде.

Для радиоэкологического мониторинга техногенных радионуклидов в зоне влияния СХК в качестве «сквозного» вида рыб нами выбран карась серебряный (*Carassius auratus gibelio*). В спектре радиоизотопов, обнаруженных в карасе из р. Ромашка в июле 2001 г. обнаружено 7 γ -излучающих радионуклидов - ^{65}Zn , ^{24}Na , ^{42}K , ^{40}K , ^{76}As , ^{239}Np (табл. 1). При этом максимальная активность во всех измеренных образцах отмечена для ^{65}Zn . Для того, чтобы оценить дальность переноса ^{65}Zn от источника загрязнения вниз по течению были отобраны пробы рыб в р. Томи ниже устья Ромашки и в р. Обь до с. Игловск [18] и далее до с. Карымкары [13] (табл.6).

Таблица 6

Содержание техногенных γ -излучающих радионуклидов (Бк/кг сырой массы) в мышечной ткани карася нижней Томи и контрольных участков по данным Торопова и др. [18]

Пункт наблюдения	^{24}Na	^{42}K	^{65}Zn	^{76}As	^{239}Np	^{60}Co
р. Ромашка	625	280	1650	19	31	2.5
р. Томь, с. Самусь	6	-	867	-	2	5
р. Томь, с. Орловка	22	-	378	-	-	-
р. Томь, устье	-	-	22	-	-	-
р. Обь, п. Игловск	-	-	-	-	-	-
р. Обь, п. Шегарка	-	-	-	-	-	-

Из данных табл. 6 хорошо видно, что по мере удаления от источника загрязнения прослеживается закономерное уменьшение содержаний короткоживущих техногенных радионуклидов в исследованных рыбах вплоть до устья р. Томи. В рыбах р. Оби радиоактивный цинк не обнаружен, из чего следует, что ^{65}Zn в силу относительно короткого периода полураспада ($T_{1/2} = 243$ дн.) отражает локальное загрязнение водной среды в зоне влияния СХК (р. Ромашка) и на 80-км отрезке р. Томь ниже выпуска сбросных вод комбината.

Содержание бета-излучающего ^{90}Sr в мышечной ткани карася из р. Ромашка в среднем невысокое - 5.5 Бк/кг сырой массы, что значительно ниже предельно допустимого уровня (ДУ), согласно принятым нормативам для рыбной продукции (ДУ для ^{90}Sr – 35 Бк/кг) [23]. Основной вклад в активность мышечной ткани рыб р. Ромашка вносит бета-излучающий радионуклид ^{32}P . По данным ЦГСЭН г. Северска и Госкомэкологии Томской области [24] содержание ^{32}P в мышечной ткани рыб в 1995-1997 гг. варьировало от 81 до 4753 Бк/кг (устье р. Ромашка), от 58 до 753 Бк/кг (с. Чернильщиково), от 9 до 443 Бк/кг (с. Самусь), от 11 до 625 Бк/кг (с. Орловка), от 16 до 120 Бк/кг (с. Красный Яр). По нормам радиационной безопасности допустимая удельная активность ^{32}P в пищевых продуктах составляет 520 Бк/кг [24].

Коэффициенты биологического накопления

Об интенсивности поглощения радионуклидов различными видами живых организмов можно судить по коэффициентам накопления (КН). Они характеризуют также миграцию радионуклидов по пищевым цепям водных биогеоценозов. КН рассчитывают как отношение уровня нуклида в соответствующем звене к концентрации в воде и грунтах или предыдущем звене пищевой цепи. Основным фактором, определяющим накопление радионуклидов во всех биотических

компонентах, является его содержание в воде и донных отложениях Прикрепленные или оседлые виды водной биоты сорбируют изотопы больше, чем организмы, совершающие суточные и сезонные миграции [3].

Наш опыт радиоэкологических наблюдений позволяет рекомендовать в качестве организмов-индикаторов короткоживущих техногенных радионуклидов прикрепленные водные растения типа рдестов, роголистника и др. [12]. Имеет смысл определять КН водными растениями только для активационных радионуклидов, которые имеют небольшой период полураспада и не накапливаются в донных отложениях. Максимальные значения КН в рдесте отмечены для ^{65}Zn (табл. 7).

Таблица 7. Коэффициенты накопления отдельных радионуклидов биообъектами р. Ромашка

Радионуклид	Удельная активность радионуклида в воде, Бк/л	Коэффициент накопления в рдесте блестящем	Коэффициент накопления в мышцах карася
^{24}Na	271	4	4
^{42}K	51	-	12
^{51}Cr	7	31	-
^{65}Zn	1	460	2360
^{76}As	41	52	0.9
^{99}Mo	13	4	-
^{131}I	1	33	-
^{133}I	5	33	-
^{137}Cs	0.01	200	-
^{239}Np	25	99	-

С одинаковой интенсивностью происходит накопление в водном растении рдесте ^{76}As , ^{51}Cr , ^{131}I , ^{133}I . В качестве мониторинговых тест-объектов среды в ближней зоне СХК целесообразно использовать также карася, который характеризуется смешанным типом питания с большой долей в рационе растительной пищи. Для радиоэкологического мониторинга удельной активности долгоживущих техногенных радионуклидов, в том числе ^{137}Cs , рекомендуют использовать представителей хищных рыб (щука, окунь, налим), так как в процессе накопления рыбами ^{137}Cs отчетливо проявляется эффект более высокого трофического уровня [2].

Поступление радионуклидов в организм человека

В экспериментальных и клинических исследованиях показано, что наиболее опасным путем поступления техногенных радионуклидов в организм человека является ингаляционный. При этом наибольшие дозы облучения накапливаются в легких, печени и скелете [25]. В 1990-е годы в условиях послечернобыльского выброса биологически значимыми искусственными радионуклидами стали ^{137}Cs и ^{90}Sr . Однако, на фоне радиоактивного распада указанных нуклидов будет, безусловно, возрастать экологическая значимость и $^{239,240}\text{Pu}$ [3]. Наиболее вероятными отдаленными последствиями поступления $^{239,240}\text{Pu}$ в организм человека являются злокачественные новообразования органов легких, печени и скелета [25]. ^{90}Sr избирательно накапливается в костной ткани и, в течение длительного периода времени, облучает клетки красного костного мозга, что обуславливает заболевание человека лейкозом [26]. Основные органы-мишени для ^{137}Cs в организме человека являются печень, селезенка, мышцы, легкие; для ^{65}Zn - простата, печень и легкие; для ^{60}Co – жировые клетки, легкие; для ^{24}Na – жировые клетки [3].

Второй путь поступления техногенных радионуклидов в организм человека - по пищевым цепочкам наземных (почва-растение-животное-человек) и водных (вода-рыба-человек) экосистем. Поскольку предметом обсуждения данной публикации является биоценоз реки, то более подробно остановимся на особенностях поступления радионуклидов по пищевой цепи вода-рыба-человек.

Взаимосвязь между уровнями радиоактивности гидробионтов и дозой, которая может влиять на здоровье людей, весьма сложна. Проведенные исследования показывают, что население, употребляющее в пищу преимущественно морепродукты, получают низкие дозы радиации. Люди, рацион питания которых в основном состоит

из продуктов, добываемых в пресноводных водоемах, получают более высокие дозы облучения как от естественных, так и техногенных радионуклидов [3]. Это объясняется тем, что специфика пресноводных водоемов проявляется в том, что в результате снижения фактора разбавления, концентрации радионуклидов в них возрастает гораздо быстрее, чем в морях и океанах. При этом слабая минерализация воды способствует более высокому накоплению радионуклидов пресноводными гидробионтами по сравнению с морскими.

В 1990-е годы был выполнен ряд оценок дозы радиации, которую мог получить человек по пищевой цепочке вода – рыба – человек. Мощности эффективности доз, получаемых при употреблении рыбы из Баренцева моря, оказались очень низкими. Они составили для населения порядка 0.6 мкЗв/год, а для рыбаков 4 мкЗв/год. При максимально наблюдаемом уровне содержания искусственных радионуклидов в морской экосистеме Кольского и Мотовского заливов мощность эффективной дозы для трофической цепи вода - рыба – человек может достигать 6.7 мкЗв/год при потреблении 100 кг рыбы в год. Основной вклад в общую дозу (около 90 %) вносит ^{137}Cs . Вклад $^{239,240}\text{Pu}$ очень незначителен [3].

По данным Б.Е. Серебрякова и др. [27] при исследовании последствий инцидента на Нововоронежской АЭС в 1985 г. оценки эффективной дозы для населения, сделанные по содержанию ^{60}Co в рыбе, дали незначимую величину, меньше 1 мкЗв/год. Это в десятки раз меньше квоты в 10 мкЗв/год, выделенной для облучения населения от радиоактивных отходов согласно Основным санитарным правилам обеспечения радиационной опасности.

Радионуклиды в донных осадках Нижней Томи

В изученных разрезах донных отложений основное внимание уделено распределению долгоживущего радиоизотопа ^{137}Cs . По данным В.М. Цибульчика и др.

[28] уровень активности ^{137}Cs в целом относительно невысокий и изменяется в интервале 2-90 Бк/кг сухой массы. Относительно повышенная активность этого радионуклида (до 35-90 Бк/кг в отдельных пробах) установлена в осадках устья пр. Чернильщикова и устья р. Томи, в осадках р. Оби ниже впадения Томи (табл. 8).

Таблица 8

Распределение ^{137}Cs , ^{152}Eu и ^{60}Co в донных осадках на различных участках р.р. Томи и Оби по данным Цибульчика В.М. и др.[28]

Интервалы опробования см	Удельная активность, Бк/кг, воздушно-сухой материал		
	^{137}Cs	^{152}Eu	^{60}Co
Осадки в устье р. Томи (ст. 56)			
0-5	54±8	18±3	18±3
30-35	48±8	15±2	14±3
55-60	90±10	10±3	15±3
Осадки в устье протоки Чернильщикова (ст. 60)			
0-5	29±5	13±4	24±3
25-30	60±3	8±3	8±2
45-50	90±10	10±3	15±2
Осадки р. Оби ниже устья р. Томи (ст. 13)			
0-5	16±4	14±3	20±3
45-50	30±4	10±3	14±3
100-105	66±9	20±5	22±3

Примечание. Анализы выполнены в Аналитическом центре ОИГМ СО РАН (замеры - В.А. Бобров)

Ниже по течению в осадках р. Оби во вскрытых разрезах донных осадков фиксируется более низкая активность ^{137}Cs (2-12 Бк/кг). Следует отметить, что осадочный материал, содержащий ^{137}Cs , имеет в составе заметную долю глинистой компоненты. Ни в одной из проб, представленных кварц-полевошпатовым песчаным материалом, активность ^{137}Cs не зафиксирована. Следует полагать, что разнозернистые пески, широко распространенные в изученных донных отложениях, не могут служить индикатором загрязнения речных осадков ^{137}Cs .

Характерная особенность распространения ^{137}Cs по разрезам донных осадков состоит в том, что этот радионуклид фиксируется непрерывно на всю глубину разрезов. Кроме того, определенно прослеживается тенденция возрастания активности ^{137}Cs в нижних частях профилей (рис. 2).

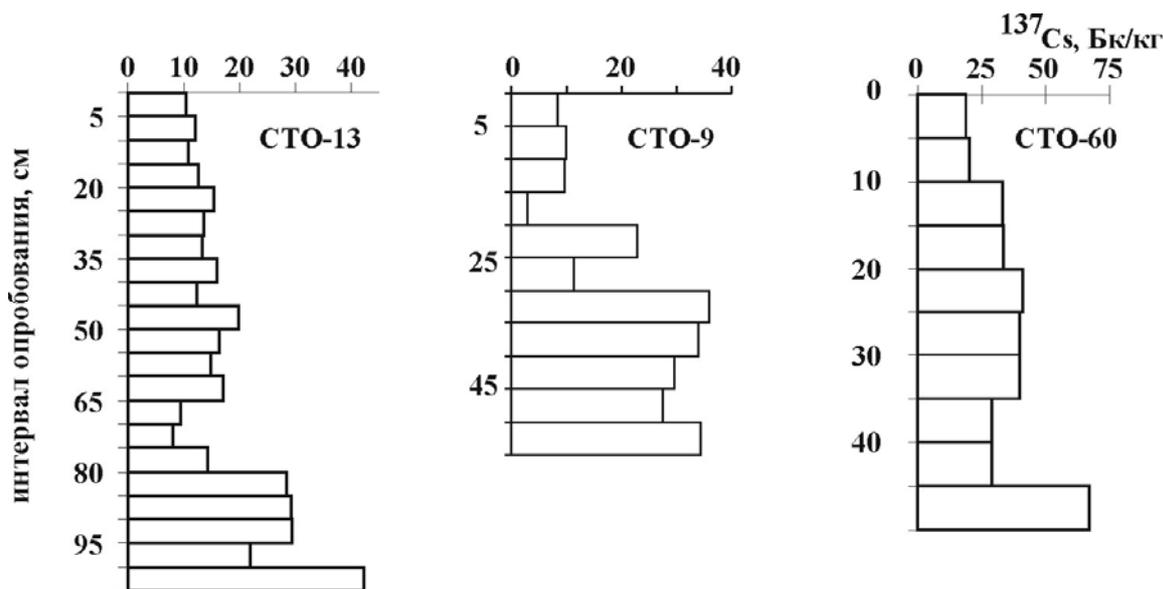


Рис. 2. Распределение ^{137}Cs в донных осадках р. Оби (СТО-13) и р. Томи (СТО-9 и СТО-60); СТО- станции отбора проб.

В экспедициях 2000-2002 гг. не удалось выйти на нулевую отметку содержания ^{137}Cs в колонке донных отложений, что объясняется большой плотностью опробованных грунтов, в результате чего отобрать керн глубже 1 метра используемым пробоотборником не получилось. В дальнейшем, планируется вскрытие речных осадков, зараженных техногенным ^{137}Cs , на полную мощность с целью датировки возраста осадка и сопоставления нижней границы залегания ^{137}Cs с началом пуска СХК.

Активность ^{152}Eu и ^{60}Co в донных осадках опробованного участка р. Томи заметно ниже, чем ^{137}Cs , и изменяется в пределах 8-24 Бк/кг (табл. 8). По данным А.В. Торопова и др. [9] достаточно высокая активность этих радионуклидов (843 и 243 Бк/кг для ^{152}Eu и ^{60}Co соответственно) отмечается в осадках р. Ромашка вблизи мест сброса отходов СХК. Для ^{152}Eu и ^{60}Co так же, как и для ^{137}Cs , прослеживается связь с глинистой компонентой осадков. Эти радионуклиды тоже распространяются на всю глубину вскрытых разрезов, однако, в отличие от ^{137}Cs , не обнаруживают тенденции роста активности в нижних частях профилей.

Для всех станций отбора проб, где зафиксированы значимые (>1 Бк/кг) величины активности ^{137}Cs , рассчитаны плотности загрязнения этим радионуклидом (или его запасы) в мКи/км² с учетом естественной плотности речных осадков [28]. Наиболее значительные запасы ^{137}Cs (от 432 до 758 мКи/км²) сосредоточены в осадках из устья р. Томи и устья пр. Чернильщикова, через которую осуществляется сброс отходов СХК (табл. 9).

Таблица 9

Уровни запасов ^{137}Cs в донных отложениях р.р. Томи и Оби по данным Цибульчика В.М. и др.[28]

Районы опробования донных отложений; номера станций отбора проб	Запасы ^{137}Cs , мКи/км ²
р. Томь, устье (ст. 9, 56)	432 , 758
р. Томь, устье пр. Чернильщикова (ст. 60)	679
р. Томь, выше пр. Чернильщикова (ст.61, 62)	-
р. Обь, 1км выше устья р. Томи (ст.54)	-
р. Обь, 40км ниже устья р. Томи (ст.13)	546
р. Обь на расстоянии 1600км вниз по течению от указанных мест опробования	41 - 76

Указанные уровни запасов радиоцезия на порядок превышают соответствующие параметры для осадков р. Оби ниже по течению. Весьма значительны (до 546 мКи/км²) запасы ^{137}Cs и в осадках р. Оби на расстоянии 40 км от устья р. Томи. Следует полагать, что осадки р. Оби на отмеченном участке испытали влияние стока р. Томи, сформировавшего донные отложения, обогащенные радиоцезием. Уровни запасов ^{137}Cs в осадках р. Оби в ее среднем и нижнем течении (от 41 до 76 мКи/км²) можно считать фоновыми. Указанные величины этого параметра вполне сопоставимы с соответствующими данными Ю.А Израэля с соавторами [29], оценившими средний уровень загрязнения территории Западной Сибири радиоцезием на рубеже третьего тысячелетия в интервале 20-100 мКи/км².

Заключение

В воде р. Томь ниже устья р. Ромашка (место выпуска сточных вод СХК) в разные периоды наблюдения фиксируется присутствие 18 короткоживущих γ -

излучающих радионуклидов, из которых наибольший вклад в сбросы СХК вносят ^{24}Na , ^{76}As , ^{239}Np .

В компонентах водной биоты (водоросли, макрофиты, рыбы) выявлен специфический спектр короткоживущих техногенных радионуклидов, отличный от спектра радионуклидов в речных донных отложениях, что свидетельствует, во-первых, о высокой эффективности захвата живым веществом наиболее подвижных в водной среде техногенных γ -излучающих радионуклидов (^{239}Np , ^{24}Na , ^{76}As и др.) и, во-вторых, о продолжающемся сбросе короткоживущих радионуклидов в р. Томи. В гидробионтах кроме короткоживущих радионуклидов зафиксированы техногенные радионуклиды с большим периодом полураспада, включая изотопы плутония. Рассчитанные коэффициенты биологического накопления показывают, что наиболее интенсивно биообъекты накапливают ^{65}Zn , причем присутствие данного радионуклида прослеживается в рыбах вплоть до устья Томи. Водное растение рдест блестящий и карась серебряный с учетом высокой аккумулирующей способности радионуклидов и широкой распространенности («сквозные» объекты) могут служить видами-биоиндикаторами при радиоэкологических исследованиях и оценке уровня радиоактивного загрязнения водной среды.

Основной вклад в радиоактивное загрязнение донных осадков нижней Томи вносят ^{137}Cs , ^{60}Co и ^{152}Eu . Относительно повышенная активность ^{137}Cs (до 35-90 Бк/кг в отдельных пробах) установлена в осадках протоки Чернильщикова и устья р. Томи, а также в осадках р. Оби (приблизительно 40-й км ниже устья Томи). Наиболее значительные запасы ^{137}Cs (от 432 до 758 мКи/км²) сосредоточены в осадках из устья р. Томи и протоки Чернильщикова, через которую осуществляется сброс отходов СХК. Указанные уровни запасов ^{137}Cs на порядок превышают соответствующие параметры для осадков р. Оби ниже по течению. Активность ^{152}Eu и ^{60}Co в донных осадках

опробованного участка р. Томи (от г. Томска до устья) заметно ниже, чем ^{137}Cs , и изменяется в пределах 8-24 Бк/кг.

Литература

1. Сухоруков Ф.В., Маликова И.Н., Гавшин В.М. и др. Техногенные радионуклиды в окружающей среде Западной Сибири (источники и уровни загрязнения) // Сибирский экологический журнал. 2000. Т.VII. № 1. С. 31-38.
2. Рябов И.Н., Полякова Н.И., Пельгунова Л.А. и др. Радиоэкологический мониторинг рыб видов-индикаторов Обь-Иртышского Бассейна // Труды XI Межд. симпозиума «Урал атомный, Урал промышленный». Екатеринбург, 2005. С. 212- 216.
3. Матишов Д.Г., Матишов Г.Г. Радиационная экологическая океанология. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2001. 417 с.
4. Цибульчик В.М., Степин А.С. Естественные радионуклиды и ^{137}Cs в природных компонентах Кемеровской области // Материалы Межд. конф., посвящ. 100-летию со дня открытия радиоактивности и 100-летию Томск. политех. ун-та «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека». Томск, 1996. С. 247-250.
5. Цибульчик В.М., Маликов Ю.И., Аношин Г.Н. ^{137}Cs и тяжелые металлы в донных отложениях р. Оби // Труды II совещания «Экология пойм сибирских рек и Арктики». Томск: Изд-во «СТТ», 2000. С.131-136.
6. Цибульчик В.М., Аношин Г.Н., Маликов Ю.И. и др. Техногенные радионуклиды в донных отложениях Обского бассейна // Материалы Второй всерос. конференции «Экологический риск». Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2001. С. 195-198.
7. Щербов Б.Л., Страховенко В.Д., Маликова И.Н. и др. Сравнительная характеристика современного радиоактивного загрязнения территорий Западной Сибири, прилегающих к Семипалатинскому и Новоземельским полигонам (на примере Алтая и Пур-Тазовского междуречья) // Сибирский экологический журнал. 2000. Т.VII. № 1. С. 51-60.
8. Горопов А.В., Зубков Ю.Г. Радиоактивное загрязнение рек Томь и Ромашка // Труды II совещания «Экология пойм сибирских рек и Арктики». Томск: Изд-во «СТТ», 2000. с.143-147.

9. Торопов А.В., Сухоруков Ф.В., Ковалев С.И., Зубков Ю.Г. Техногенные радионуклиды в воде и донных отложениях нижней Томи // Вестник ТГУ. Сер. «Науки о Земле». Приложение: материалы научной конференции «Проблемы геологии и географии Сибири». № 3 (V). Томск, 2003. С 220-222.
10. Торопов А.В., Зубков Ю.Г., Леонова Г.А. и др. Особенности радиоэкологической ситуации в биогидроценозе нижней Томи // Материалы II Межд. конференции «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека». Томск: Изд-во «Тандем-Арт», 2004. С.630-634.
11. Леонова Г.А., Бобров В.А., Торопов А.В. и др. Мониторинг техногенных радионуклидов и тяжелых металлов в ближней зоне влияния Сибирского химического комбината // Вестник ТГУ. Сер. «Науки о Земле». Приложение: материалы научной конференции «Проблемы геологии и географии Сибири». № 3 (V). Томск, 2003. С 159-161.
12. Леонова Г.А., Торопов А.В., Бобров В.А. и др. Техногенные радионуклиды и тяжелые металлы в воде и биообъектах реки Ромашка (ближняя зона влияния СХК) // Сб. научн. тр. «Современные достижения в исследованиях окружающей среды и экологии». Томск: Изд-во «СТТ», 2004. С. 72-75.
13. Леонова Г.А., Торопов А.В., Бобров В.А. и др. Загрязнение рыбы реки Томь техногенными радионуклидами в зоне влияния Сибирского химического комбината // Материалы межд. конференции «Пищевые ресурсы дикой природы и экологическая безопасность населения». Киров, 2004. С. 140-142.
14. Сухоруков Ф.В., Дегерменджи А.Г., Белолипецкий В.М. и др. Закономерности распределения и миграции радионуклидов в долине реки Енисей. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2004. – 286 с.
15. Рихванов Л.П. Состояние окружающей среды и здоровье населения в зоне влияния Сибирского химического комбината: аналитический обзор. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 1994. - 226 с.
16. Чеботина М.Я., Куликов Н.В. Экологические аспекты изучения миграции радионуклидов в континентальных водоемах // Экология. 1998. № 4. С. 282- 290.
17. Гусева В.П., Чеботина М.Я. Радиоэкологические исследования планктона водоема-охладителя Белоярской АЭС // Экология. 2001. № 4. С. 274-279.
18. Павлоцкая Ф.И., Мясоедов Б.Ф. Определение трансурановых элементов в объектах природной среды // Радиохимия. 1996. Т. 38. Вып. 3. С. 193-209.

19. Болсуновский А.Я., Черкезян В.О., Барсукова К.В., Мясоедов Б.Ф. Исследование высокоактивных проб почв и «горячих частиц» поймы реки Енисей // Радиохимия. 2000. Т. 42. № 6. С. 560-564.
20. Сухоруков Ф.В., Мельгунов М.С., Ковалев С.И., Болсуновский А.Я. «Горячие частицы» в аллювиальных отложениях реки Енисей в ближней зоне влияния Красноярского ГХК (новые данные) // // Материалы II Межд. конференции «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека». Томск: Изд-во «Тандем-Арт», 2004. С. 601-605.
21. Бакунов Н.А., Панасенкова О.И., Дричко В.Ф. ^{90}Sr , ^{137}Cs и естественные радионуклиды в экосистеме глубоководного озера // Экология. 1999. № 5. С. 392-394.
22. Саксен Р., Коскелайнен У. Влияние локальных характеристик водоема на перенос ^{137}Cs и ^{90}Sr в организм пресноводных рыб // Радиохимия. 2001. Т. 43. № 5. С. 429-433.
23. Гудков Д.И., Деревец В.В., Кузьменко М.И. и др. Гидробионты зоны отчуждения Чернобыльской АЭС: современные уровни содержания радионуклидов, дозовые нагрузки и цитогенетические эффекты // Материалы II Межд. конференции «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека». Томск: Изд-во «Тандем-Арт», 2004. С. 167-171.
24. Экологический мониторинг. Состояние окружающей природной среды Томской области в 1998 году. Госкомитет по охране окружающей среды Томской области. Томск: Изд-во «Тандем-Арт», 1999. 52 с.
25. Сокольников М.Э., Кошурникова Н.А. Риск рака легкого при ингаляционном поступлении промышленных соединений плутония-239 // Труды XI Межд. симпозиума «Урал атомный, Урал промышленный». Екатеринбург, 2005. С. 216 - 218.
26. Шагина Н.Б. Анализ дозиметрических моделей кости для оценки доз внутреннего облучения от стронция-90 // Труды XI Межд. симпозиума «Урал атомный, Урал промышленный». Екатеринбург, 2005. С. 142-144.
27. Серебряков Б.Е., Орлова Е.И., Петухова Э.В. и др. Последствия инцидента 1985 г. на Нововоронежской АЭС // Труды XI Межд. симпозиума «Урал атомный, Урал промышленный». Екатеринбург, 2005. С. 119-120.
28. Цибульчик В.М., Аношин Г.Н., Бобров В.А. и др. Техногенные радионуклиды в донных осадках р. Томи (Западная Сибирь) // Selected Paper presented at the International Conference ESFEA - 2001 «Environment of Siberia, the Far East and the Arctic». Tomsk, 2001. P. 168-172.

29. Израэль Ю.А., Квасникова Е.В., Назаров И.М., Стукин Е.Д. Радиоактивное загрязнение цезием-137 территории России на рубеже веков // Метеорология и гидрология. 2000. № 4. С. 20-31.