

Экология и природопользование
Шамшурина Е.Н., Куракова А.А., Коноплев А.В., Голосов В.Н.

Научная статья

УДК 631.43.539.16

doi: 10.17072/2079-7877-2025-3-143-164

EDN: LUPGCI



**РАДИОАКТИВНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ
ПОЙМ И ВОДЫ РЕК ТЕЧИ И ИСЕТИ ЦЕЗИЕМ-137**

**Евгения Николаевна Шамшурина¹, Анна Александровна Куракова², Алексей Владимирович Коноплев³,
Валентин Николаевич Голосов⁴**

¹⁻⁴ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

¹ shamshyr@mail.ru, RSCI Author ID: 99298, Scopus Author ID: 36169956400, ORCID: 0000-0002-6842-5115

² a.a.kurakova@mail.ru, RSCI Author ID: 1037958, Scopus Author ID: 57221853144, ORCID: 0000-0003-0234-6454

³ alexeikonoplev@gmail.com, RSCI Author ID: 66161, Scopus Author ID: 16689494800, ORCID: 0000-0002-9930-8739

⁴ golossov@gmail.com, RSCI Author ID: 58855, Scopus Author ID: 7003600463, ORCID: 0000-0002-4351-8323

Аннотация. В статье представлен анализ данных из литературных источников и данных мониторинга Росгидромета по радиоактивному загрязнению ^{137}Cs пойменных территорий и вод рек Течи и Исети, являющихся частью Обь-Иртышского бассейна. Детально рассматриваются последствия сбросов радиоактивных отходов в реку Течу (1949–1951 гг) и аварии резервуара с высокоактивными жидкими радиоактивными отходами на производственном объединении «Маяк». Проведенный анализ выявил существенные различия в распределении радиоактивного ^{137}Cs между реками: наблюдается снижение объемной активности ^{137}Cs вниз по течению р. Течи, в то время как в р. Исети уровни загрязнения остаются относительно стабильными на разных участках. Источниками вторичного загрязнения вод р. Течи являются участки загрязненной поймы, так как несмотря на прошедшие десятилетия, составляющие более 2 периодов полураспада ^{137}Cs ($T_{1/2}=30,2$ года), уровни загрязнения на некоторых участках поймы исследуемых рек остаются высокими. Отмечено, что при сборе и анализе данных по накоплению, аккумуляции и распределению радиоцезия в пойменных ландшафтах массово не использовались методологические подходы, развитые в геоморфологии и ландшафтovedении. Во-первых, практически нет данных по гидрологическим аспектам: не проводился анализ стока воды и наносов, их сезонных и многолетних колебаний. Во-вторых, при обследовании долин рек Течи и Исети во многих работах отсутствовала точная топографическая привязка мест отбора проб, в связи с отсутствием картографической основы надлежащего качества и низкой точности GPS оборудования в тот момент, а послойный отбор образцов из пойменных отложений как правило осуществлялся с большим шагом в 5 см. Эти недостатки, связанные с техническими возможностями на момент массовых исследований в пойме р. Течи, несколько ограничивают возможности корректной интерпретации полученных результатов оценок процессов горизонтальной миграции и перераспределения радионуклидов на разных расстояниях от основных зон загрязнения.

Ключевые слова: латеральная миграция, аккумуляция, техногенные аварии, цезий-137, пойма.

Финансирование. результаты получены при финансовой поддержке проекта Правительства Российской Федерации, реализуемого в рамках соглашения №075-15-2025-008 от 27.02.2025 г.

Для цитирования: Шамшурина Е.Н., Куракова А.А., Коноплев А.В., Голосов В.Н. Радиоактивное загрязнение пойм и воды рек Течи и Исети цезием-137 // Географический вестник=Geographical bulletin. 2025. № 3(74). С.143–164 DOI: 10.17072/2079-7877-2025-3-143-164. EDN: LUPGCI

Original article

doi: 10.17072/2079-7877-2025-3-143-164

EDN: LUPGCI

**RADIOACTIVE CONTAMINATION BY CESIUM-137
OF FLOODPLAINS AND WATER OF THE TECHA AND ISET RIVERS**

Evgenia N. Shamshurina¹, Anna A. Kurakova², Alexey V. Konoplev³, Valentin N. Golosov⁴

¹⁻⁴ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

¹ shamshyr@mail.ru, RSCI Author ID: 99298, Scopus Author ID: 36169956400, ORCID: 0000-0002-6842-5115

² a.a.kurakova@mail.ru, RSCI Author ID: 1037958, Scopus Author ID: 57221853144, ORCID: 0000-0003-0234-6454

³ alexeikonoplev@gmail.com, RSCI Author ID: 66161, Scopus Author ID: 16689494800, ORCID: 0000-0002-9930-8739

⁴ golossov@gmail.com, RSCI Author ID: 58855, Scopus Author ID: 7003600463, ORCID: 0000-0002-4351-8323



© 2025 Шамшурина Е. Н., Куракова А. А., Коноплев А. В., Голосов В. Н. Лицензировано по СС BY 4.0. Чтобы просмотреть копию этой лицензии, перейдите по ссылке <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Экология и природопользование
Шамшуриной Е.Н., Кураковой А.А., Коноплевой А.В., Голосовым В.Н.

Abstract. The article presents an analysis of data from literature sources and actual data from Roshydromet on radioactive contamination with ^{137}Cs of floodplain territories and waters of the Techa and Iset rivers, which are part of the Ob-Irtysh basin. The consequences of radioactive waste discharges into the Techa River (1949–1951) and the accident at the reservoir containing high-level liquid radioactive waste at the Mayak Production Association (PO Mayak) are examined in detail.

The analysis revealed significant differences in the distribution of radioactive ^{137}Cs between the rivers: there is a decrease in the volumetric activity of ^{137}Cs downstream of the Techa River, while in the Iset River contamination levels remain relatively stable in different sections. The sources of secondary contamination of the Techa River waters are sections of the contaminated floodplain since, despite the decades that have passed (this period exceeding more than 2 half-lives of ^{137}Cs ($T_{1/2} = 30.2$ years)), contamination levels in some sections of the floodplain of the studied rivers remain high.

It is noted that methodological approaches developed in geomorphology and landscape science were not widely used when collecting and analyzing data on the accumulation, accretion, and distribution of radiocesium in the floodplain landscapes. Firstly, there was insufficient attention to hydrological aspects: there was no detailed analysis of water and sediment runoff, of the seasonal and long-term fluctuations. Secondly, when surveying the valleys of the Techa and Iset rivers, many studies lacked precise topographic referencing of sampling locations due to the absence of a cartographic base of appropriate quality and the low accuracy of GPS equipment at that time. Layer-by-layer sampling of floodplain deposits was typically carried out with a large step of 5 cm. These shortcomings, associated with technical capabilities at the time of mass studies in the Techa River floodplain, significantly limit the possibilities for correct interpretation of the results of assessments of horizontal migration processes and redistribution of radionuclides at different distances from the main contamination zones.

Keywords: lateral migration, accumulation, man-made accidents, ^{137}Cs , floodplain

Funding: this work was supported by a grant from the Government of the Russian Federation (agreement No. 075-15-2025-008 of 27 February 2025).

For citation: Shamshurina, E.N., Kurakova, A.A., Konoplev, A.V., Golosov, V.N. (2025). Radioactive contamination by cesium-137 of floodplains and water of the Techa and Iset rivers. *Geographical Bulletin*. No.3(74). Pp.143–164. DOI: 10.17072/2079-7877-2025-3-143-164. EDN: LUPGCI

Введение

Техногенные аварии на объектах, связанных с ядерной энергетикой, включая её производство и последующую переработку отходов, являются одними из наиболее значимых по масштабам и пространственному охвату. К их числу в первую очередь относятся аварии на Чернобыльской атомной электростанции (АЭС) в апреле 1986 г. и на АЭС Фукусима-дайити в марте 2011 г. [60, 20]. В этом же ряду стоит авария на производственном объединении (ПО) «Маяк» в сентябре 1957 г., вследствии которой сформировался Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС), затронувший западную часть Обь-Иртышского речного бассейна (ОИБ) [6]. Также с деятельностью данного предприятия связано загрязнение р. Течи, в которую осуществлялся сброс низко- и среднеактивных жидких радиоактивных отходов ПО «Маяк». Помимо этого, в бассейне р. Обь есть ещё ряд источников поступления техногенных радионуклидов в постоянные водотоки, возникших в результате аварийных ситуаций и регулярных сбросов на предприятиях ядерно-топливного цикла (ЯТЦ), проведения атмосферных и подземных ядерных взрывов [58].

В водах, донных отложениях и пойменных почвах Обь-Иртышского речного бассейна содержатся значительные количества радиоактивного ^{137}Cs , о чем свидетельствует «Обская зона повышенной активности ^{137}Cs », где за счет перепада температуры, изменения химического состава вод и скорости течения образовался геохимический барьер, приводящий к депонированию ^{137}Cs [32, 47].

Радионуклиды, содержащиеся в воздухе, воде, почве, донных отложениях, растениях, являются источником внутреннего и внешнего облучения человека. К настоящему времени, после того как распалась большая часть короткоживущих радионуклидов, основную роль в облучении человека и биоты на территории ОИБ играют ^{137}Cs и ^{90}Sr с периодом полураспада около 30 лет.

Наиболее загрязненным участком ОИБ является речная система р. Исети, которая сама протекает в пределах ВУРСа, и в которую впадают более мелкие реки с ВУРСа и Карабаевского следа, а также р. Теча, сильно загрязненная в результате сбросов радиоактивных отходов ПО «МАЯК».

В статье проведено обобщение результатов исследований по оценке латеральной миграции ^{137}Cs в бассейне р. Исети вплоть до впадения её в р. Тобол и его переотложения на поймах рек бассейна, дан их критический анализ.

Экология и природопользование
Шамиурина Е.Н., Куракова А.А., Коноплев А.В., Голосов В.Н.

Объект исследования

Источники радиоактивного загрязнения ^{137}Cs на территории ОИБ

Основными источниками поступления ^{137}Cs на территории РФ являются:

- Глобальные атмосферные выпадения в результате испытаний ядерного оружия в атмосфере, проводившиеся в 1945–1991 гг ядерными державами. Общее мировое поступление ^{137}Cs в стратосферу за счет проведенных ядерных испытаний равно примерно 960 ПБк. Наиболее интенсивные выпадения следовали с некоторым отставанием во времени от моментов взрыва в атмосфере. Начало значимых выпадений ^{137}Cs можно отнести к 1954 г, затем в северном полушарии наблюдаются два пика: меньший – 1957–1959 гг., максимальный – 1963 г. [48, 62]. После 1964 г. интенсивность выпадений быстро убывала как результат подписания США, СССР и Соединенным Королевством Договора о запрещении испытаний ядерного оружия в атмосфере, в космическом пространстве и под водой (Москва, 1963 г) и с 1971 г. стабилизировалась на приблизительно одном уровне. В настоящее время за содержанием радионуклидов в приземной атмосфере и в атмосферных выпадениях регулярно ведутся наблюдения на стационарных и мобильных пунктах, входящих в систему радиационного мониторинга Росгидромета.

- Аварийные выбросы радионуклидов в результате подземных ядерных взрывов в рамках госпрограммы СССР «Ядерные взрывы для Народного хозяйства».

- Радиоактивные отходы с относительно небольшой удельной активностью в режиме строго контролируемого поступления в биосферу: сброс жидких радиоактивных отходов (ЖРО) в специальные водоемы, захоронение в грунт, выброс через вентиляционные заводские системы в атмосферу.

- Выбросы в атмосферу и сбросы в гидросферу в результате аварийных ситуаций на объектах ЯТЦ, АЭС и пр.

На 2000 год суммарный запас ^{137}Cs на территории России оценивался в $5,66 \cdot 10^{16}$ Бк (1,53 млн. Ки), из которых 58 % приходится на глобальное загрязнение, 38 % является следствием выпадений в результате аварии на ЧАЭС, 3,6 % – следствием аварии и инцидентов в районе НПО "Маяк", 0,4 % – следствием сбросов жидких радиоактивных отходов Красноярским ГХК в р. Енисей, прочие источники – менее 0,1 % [39].

Существенный вклад в радиоактивное загрязнение территории Западной Сибири и непосредственно водосборной территории ОИБ вносили и вносят многочисленные источники, представленные на рис. 1.

Некоторые из данных источников радиоактивных выбросов и сбросов расположены вне водосборной площади ОИБ (полигоны Новая Земля, Тоцкий, Лобнор), однако вероятность дальних и трансграничных переносов загрязняющих веществ высокая. Анализ архивных данных о метеообстановке при проведении атмосферных ядерных испытаний на Семипалатинском полигоне обнаружил, что для 13 был характерен северо-восточный и восточный перенос воздушных масс на территорию непосредственно премыкающую к истоку р.Иртыш [31].

Основной вклад в загрязнение компонентов экосистемы ОИБ (воздух, вода, донные осадки, почва, растения) вносят промышленные и аварийные выбросы радионуклидов с предприятий ЯТЦ. В ходе исполнения советского «Атомного проекта» по созданию атомного оружия в середине XX века в непосредственной близости к истоку реки Течи было создано предприятие – ПО «Маяк». Здесь в период с 1949 по 1967 годы по разным причинам произошли три события, которые привели к масштабному радиоактивному загрязнению территории, прилегающей к предприятию, а также территории, располагающейся к северо-востоку от ПО «Маяк» (рис. 2А). Также вторичному радиоактивному загрязнению были подвержены днища долин рек, притоков р. Тобол, впадающих в него с запада, по которым радионуклиды распространялись совместно со стоком воды и наносов.

Во-первых, в период с 1949 по 1951 год применялись упрощённые схемы обращения с радиоактивными отходами в условиях острого дефицита ресурсов, времени и информации о влиянии радиоактивности на биоту. В связи с этим низкоактивные и среднеактивные ЖРО сливались непосредственно в верхнем течении р. Течи, что привело к загрязнению воды, донных отложений и пойменных почв по всему днищу долин р. Течи и р. Исети (ниже по течению от впадения р. Течи) (рис. 2Б). В 1956 году, в 12 км ниже точки сброса ЖРО русло реки Течи было перекрыто земляной плотиной и был создан водоем В-10, а в 1964–1965 гг. ниже по течению реки был сооружен еще один непроточный водоем – В-11. С этого момента времени в верховьях р. Течи эксплуатируется сложная гидротехническая система, включающая четыре водоема, ограждающие дамбы и обводные каналы, которая получила название Теченского каскада водоемов (ТКВ).

Экология и природопользование
Шамиурина Е.Н., Куракова А.А., Коноплев А.В., Голосов В.Н.

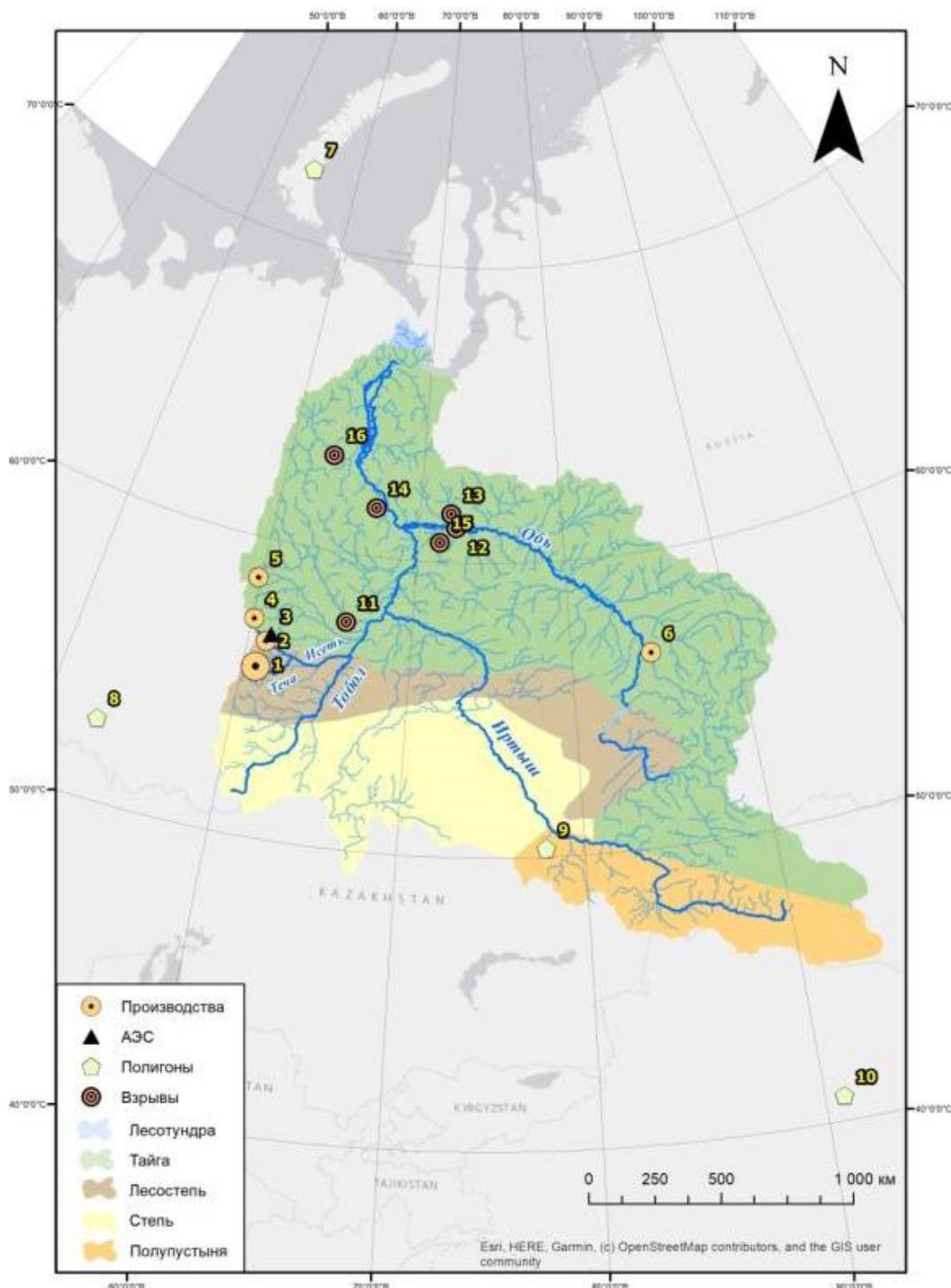


Рис. 1. Карта источников радиоактивного загрязнения ОИБ:

- 1 – ПО «Маяк», 2 – АО «Ключевский завод ферросплавов», 3 – Белоярская атомная электростанция,
 4 – АО «Уральский электрохимический комбинат», 5 – ФГУП «Комбинат «Электрохимприбор»,
 6 – АО «Сибирский химический комбинат»; 7 – Новоземельский полигон, 8 – Тотский полигон,
 9 – Семипалатинский полигон, 10 – полигон Лобнор; Мирные ядерные взрывы: 11 – «Тавда»,
 12 – «Бензол», 13 – «Кварц-3», 14 – «Ангара», 15 – «Кимберлит-1», 16 – «Кратон-1» [16, 20, 21]

Fig. 1. Map of radioactive contamination sources in the Ob-Irtysh basin:

- 1 – PO Mayak, 2 – Klyuchevsky Ferroalloy Plant AO (JSC), 3 – Beloyarskaya Atomic Power Plant,
 4 – Ural Electrochemical Combine AO (JSC), 5 – Combine ‘Elektrokhimpribor’,
 6 – Siberian Chemical Combine AO (JSC); 7 – Novozemelsk test site, 8 – Totsky test site,
 9 – Semipalatinsk test site, 10 – Lobnor test site; Peaceful nuclear explosions: 11 – Tavda,
 12 – Benzol, 13 – Quartz-3, 14 – Angara, 15 – Kimberlite-1, 16 – Kraton-1 [16, 20, 21].

Экология и природопользование
Шамиурина Е.Н., Куракова А.А., Коноплев А.В., Голосов В.Н.

За первые несколько лет работы ПО «Маяк» и сбросов ЖРО в речную сеть сформировалось радиоактивное загрязнение ^{137}Cs поймы р. Течи, и в дальнейшем радиационная обстановка р. Течи (и в целом речной системы Теча–Исеть) определялась именно этими сбросами ЖРО. В литературе встречаются достаточно противоречивые данные об уровнях радиоактивного загрязнения территорий в верхнем течении р. Течи, однако они были очень высокие. Например, по данным российско-норвежского проекта по оценке радиационной обстановки в пойме р. Течи в 1994–1996 гг. [63], плотность радиоактивного загрязнения ^{137}Cs локально достигала критично высоких показателей (свыше 15000 Ки/км²) на некоторых участках (Асановские болота, выше впадения р. Зюзелга в р. Течу). Однако, на картах загрязнения ^{137}Cs этой территории, на данном участке отмечаются уровни загрязнения 70–150 Ки/км² [2]. Основное загрязнение поймы Течи было сформировано в 1951 году в результате аномально-высокого половодья. За этот период было сброшено $76 \cdot 10^6 \text{ м}^3$ отходов общей радиоактивностью 10^{17} Бк , среди которых ^{137}Cs составлял 12,2 % [19]. Это стало причиной создания санитарно-защитной зоны площадью около 8,8 тыс. га вдоль р. Течи, что привело к запретам на хозяйственную деятельность и выводу из использования более 5 тыс. га земель.

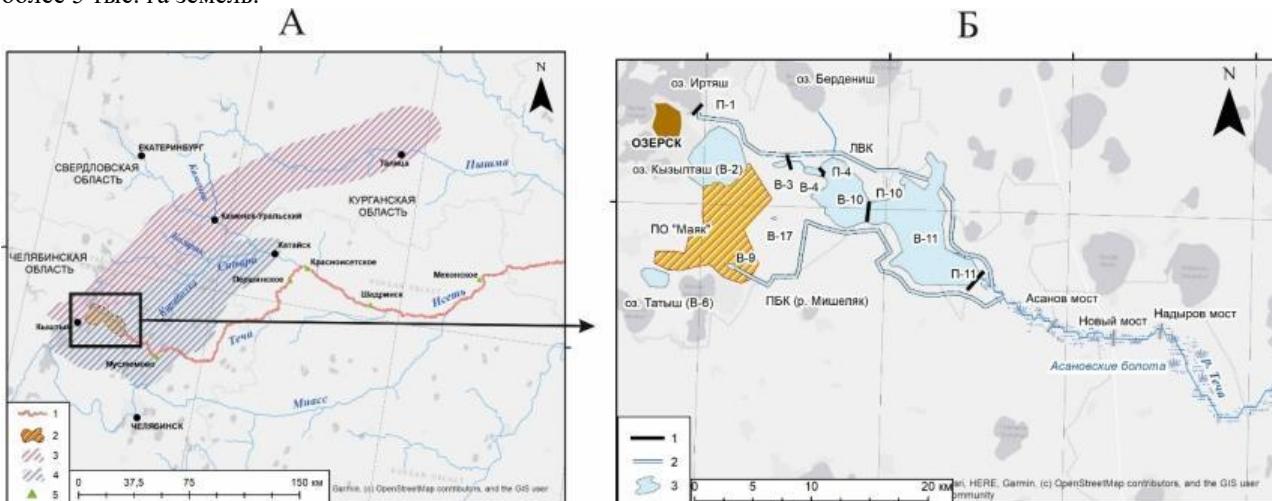


Рис. 2. А – Схема радиоактивного загрязнения в результате деятельности и аварий на ПО Маяк [2]:
1 – загрязнённое днище долин рек Теча и Исеть, 2 – ПО «Маяк», 3 – ВУРС, 4 – «Карачаевский» след,
5 – пункты мониторинговых наблюдений за содержанием ^{137}Cs в воде;

Б – Схема расположения гидротехнических сооружений ПО «Маяк» и прилегающая территория:

- 1 – плотины ТКВ, 2 – каналы (ЛВК – левобережный канал, ПБК – правобережный канал), 3 – водоемы ТКВ
- Fig. 2. А – Scheme of soil radioactive contamination as a result of activities and accidents at the PO Mayak [2]:
1 – contaminated bottom of the Techa and Iset river valleys, 2 – PO Mayak, 3 – East Urals Radioactive Trace (EURT),
4 – Karachay trace, 5 – monitoring points for ^{137}Cs content in water;

Б – Schematic plan of water engineering installations at the PO Mayak and peripheral area:

- 1 – dams at the Techa's reservoirs cascade, 2 – canals (ЛВК – left-bank canal, ПБК – right-bank canal), 3 – reservoirs of the Techa's reservoirs cascade

Второе событие – так называемая «Кыштымская авария», когда 29 сентября 1957 г. взорвалась одна из емкостей для хранения высокоактивных отходов (80 т. жидких отходов с общей радиоактивностью 20 МКи). 90 % отходов (18 МКи) осело на территории промплощадки ПО Маяк, где плотность загрязнения составляла от 4000 Ки/км²), а 10 % было поднято в воздух на высоту до 1 км. Подхваченное ветром облако перемещалось в северо-восточном направлении, выпадающие из него осадки сформировали радиоактивно загрязненную полосу длиной 300 км и шириной 30–50 км, получившее название Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС) (рис. 2А). Благодаря сложившейся метеообстановке, радиоактивное облако не затронуло крупные населенные пункты городского типа. На наиболее загрязненной территории в 1966 году был организован Восточно-Уральский государственный заповедник.

В зоне ВУРСа прекратили существование 12 колхозов, из пользования которых было выведено более 28 тыс. га сельскохозяйственных угодий, в том числе: пашни – около 19 тыс. га, пастбищ – почти 3 тыс. га, сенокосов – более 5 тыс. га. Санитарно-охранная зона ВУРСа занимала около 59 тыс. га, из этой площади уже к 1982 году было возвращено в хозяйственный оборот более 80 % [14, 55].

Третье событие произошло весной 1967 года – ветровой перенос радиоактивной пыли с озера Каракай в результате необычных для данного климата погодных условий: низкое количество атмосферных осадков в течение зимы 1966–1967 гг.; ранняя и сухая весна; сильные порывистые ветра. В озере Каракай было аккумулировано около 120 млн Ки активности, из которых 60 % приходилось на запас ^{137}Cs (60 %) и (40 %) – ^{90}Sr . В связи с резким понижением уровня воды в водоёме Каракай произошло оголение береговой полосы озера и вовлечение в пыле-

Экология и природопользование
Шамиурина Е.Н., Куракова А.А., Коноплев А.В., Голосов В.Н.

образование радиоактивных донных отложений. Суммарная активность выброшенных в атмосферу радионуклидов оценивалась величиной 0,6 МКи (48 % приходилось на ^{137}Cs), а площадь загрязнения составила 2700 км² (вне производственной территории ПО «Маяк») (рис. 2А) [46, 43].

Общая площадь зоны радиоактивного загрязнения в результате деятельности ПО «Маяк» в границе 7,4 кБк/м² (0,2 Ки/км²) по ^{137}Cs составила 10170 км² [49] (рис. 2А).

Содержащаяся в «Отчете по экологической безопасности ПО «Маяк»» за 2021 года информация [42] указывает на то, что регулируемые промышленные выбросы радионуклидов в атмосферу происходили с момента запуска предприятия и продолжаются до сих пор. В настоящее время нормативы допустимых выбросов (ДВ) в атмосферу по ^{137}Cs составляют $5,70 \cdot 10^{10}$ Бк/год. Фактические выбросы радиоактивных веществ в 2021 году составили по ^{137}Cs – 2,08 % от ДВ или $1,42 \cdot 10^9$ Бк. Значения плотности радиоактивных выпадений в 2021 году находятся на среднем многолетнем уровне, не превышают установленных значений контрольных уровней и обусловлены не текущими выбросами в атмосферу, а процессами ветрового подъема и переноса радионуклидов с ранее загрязненных территорий ВУРСа и «Карачаевского» следа. По официальным данным, сброс ЖРО в открытую гидрографическую сеть в настоящее время ФГУП «ПО «Маяк» не производит.

Радиационный след Чернобыльской катастрофы 26 апреля 1986 года достиг территории ОИБ, что привело к его дополнительному загрязнению. Аэrogаммаспектральная съемка 1991 года, проведенная специалистами ПГО «Аэрогеология», выявила два протяженных с запада на восток следа радиоактивного ^{137}Cs на территории Свердловской и Тюменской областей с концентрацией выше 0,1 Ки/км²; при радиоэкологическом картографировании территории была учтена ее ландшафтная структура [2, 20].

Физико-географическая характеристика бассейнов рек Теча и Исеть.

Реки Теча и Исеть протекают в лесостепной почвенно-климатической зоне, которая характеризуется континентальным климатом. Средняя температура зимой составляет $-15,5^\circ\text{C}$, летом $+17^\circ\text{C}$. Среднегодовое количество осадков варьирует в интервале 430–480 мм с максимумом в июле. Река Теча относится к средним рекам и берет свое начало из озера Иртыш на Южном Урале (рис. 2Б). Река Исеть относится к большим рекам и вытекает из Исетского водохранилища на Среднем Урале. Основные характеристики рек Исеть и Теча приведены в табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Основные среднемноголетние гидрологические характеристики рек Теча и Исеть [12]
Main long-term average annual hydrological characteristics of the Techa and Iset rivers [12]

Река	F , тыс. км ²	L , км	I , %	B , м	h , м	Сток воды, км ³ /год	Сток наносов, млн т/год	$Q_{ср}$, м ³ /с	$Q_{макс}$, м ³ /с	$Q_{мин л-о}$, м ³ /с
Теча	7,6	243	1,3	20–80	0,3–2,1	0,18	0,015	6,7	290	0,6
Исеть	58,9	606	3,3	40–120	0,6–5	3,11	0,11	65,4	2470	3,5

где, F – площадь бассейна, L – длина реки, I – уклон русла, B – ширина русла, h – глубина русла, $Q_{ср}$ – среднегодовой расход воды, $Q_{макс}$ – максимальный расход воды, $Q_{мин л-о}$ – минимальный расход воды летне–осенней межени.

В реку Исеть, в пределах зоны радиоактивного загрязнения территории бассейна впадают помимо р. Течи еще реки Синара и Катайка, в которые в свою очередь впадает еще ряд более мелких притоков (табл. 2).

Таблица 2
Table 2

Основные водотоки речной системы Исеть, протекающие по загрязненной территории [13]
Main watercourses of the Iset River system flowing through the polluted territory [13]

Название	Место впадения в р. Исеть от устья, км	Берег	Длина водотока, км	Водосборная площадь, кв. км	Впадают озера, шт.	Притоки, шт.
Теча	353	прав	243	7600	40	6
Катайка	387	лев	22	–	0	0
Синара	402	прав	148	6690	12	4
Шутишка	37	лев	19	–	0	0
Боровая	39	лев	16	–	0	0
Басказык	61	прав	28	936	0	11
Межевая	88	лев	12	–	0	1
Зюзелга	201	прав	58	691	0	7
Мишеляк	226	прав	21	0	0	0
Исток	25	лев	29	–	0	0
Багаряк	41	лев	80	1750	10	3
Караболка	70	лев	76	1170	6	0
Топка	95	прав	14	–	0	0

Экология и природопользование
Шамиурина Е.Н., Куракова А.А., Коноплев А.В., Голосов В.Н.

Реки региона по Б.Д. Зайкову [18] имеют западносибирский тип водного режима, который характеризуются сравнительно невысоким и продолжительным во времени весенним половодьем, в период которого проходит до половины годового стока, повышенным летне-осенним стоком (более 30 % стока воды) и низкой зимней меженью, на которую приходится не более 20 % стока воды (рис. 3).

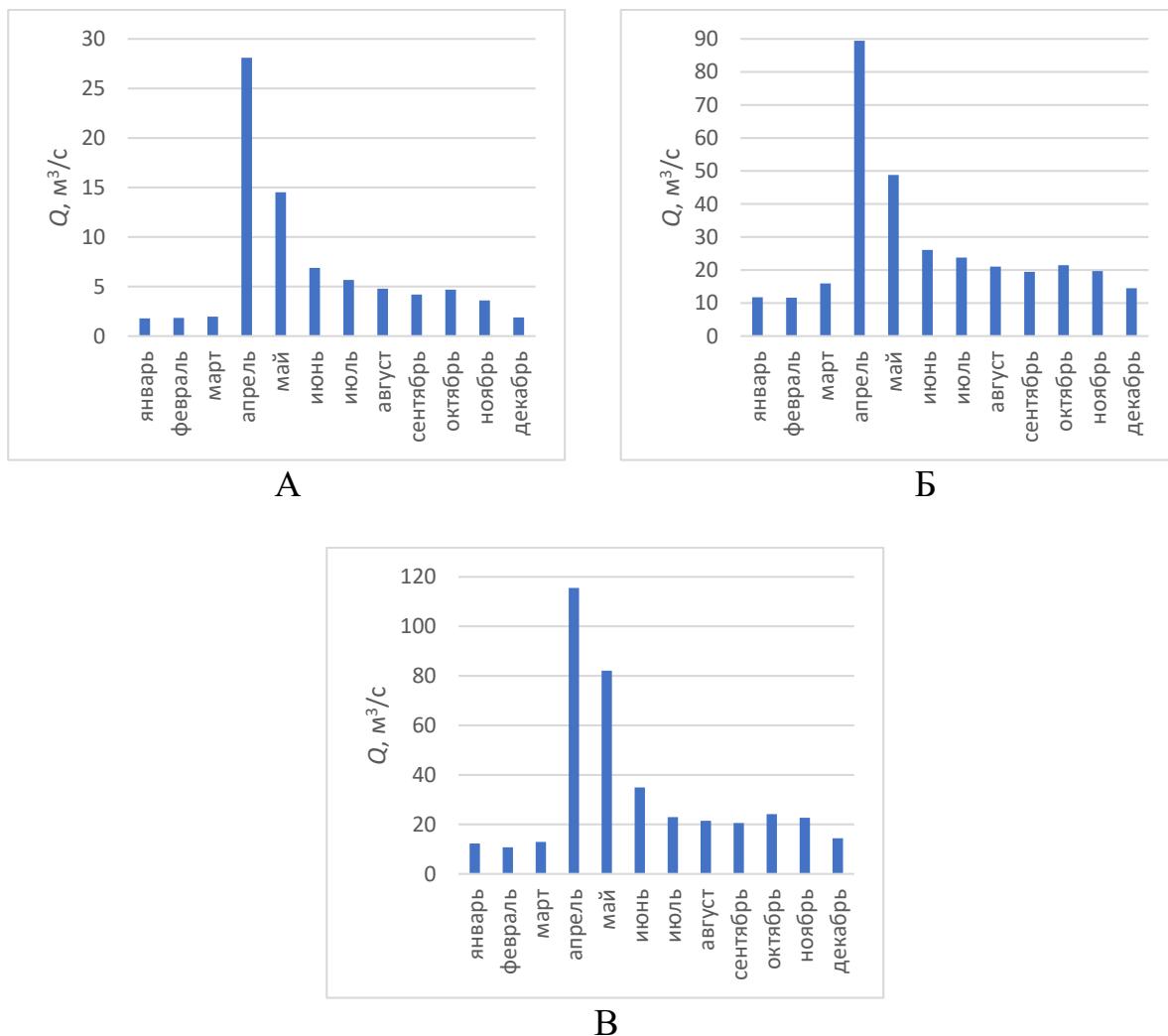


Рис. 3. Средний ежемесячный расход, $\text{м}^3/\text{с}$:
 А – реки Теча за период 1941–1980 гг. в створе Першинское; Б – реки Исеть за период 1958–1989 гг. в створе Катайск; В – реки Исеть за период 1975–1989 гг. в створе Шадринск. Источник данных [45]

Fig. 3. Average monthly discharge, m^3/s
 А – at the Techa River for the period 1941–1980 at Pershinskoye; Б – at the Iset River for the period 1958–1989 at Kataysk; В – at the Iset River for the period 1975–1989 at Shadrinsk (according to [45])

Питание р. Течи осуществляется преимущественно за счет снеговых талых вод, а в верховьях реки – за счет многочисленных озер. Расход воды р. Течи 1 %-ой обеспеченности составляет в период весеннего половодья 460 $\text{м}^3/\text{с}$, в период дождевых паводков – 100 $\text{м}^3/\text{с}$ соответственно. Максимум подъема уровня воды р. Течи достигает 50–75 см/сут, среднее значение составляет – 36 см/сут. Спад воды в основном происходит в конце апреля – начале мая, но часто вода может застаиваться на пойме до конца июня. Максимум скорости спада воды такая же, как и подъема – 50–75 см/сут, а в среднем составляет – 11–18 см/сут. Летняя межень выражена, к концу лета – началу осени наблюдаются минимальные уровни воды в реках. Минимальные среднемесячные расходы воды Течи 95%-ной обеспеченности в период летне-осенней межени составляют 0,6 $\text{м}^3/\text{с}$, в период зимней межени – 0,22 $\text{м}^3/\text{с}$ (табл. 1). Огромное значение в питании рек имеют заболоченные участки поймы (например, наиболее радиоактивно загрязненный район Асановских болот), которая аккумулирует талые и дождевые воды и постепенно их отдает в межень. Подземное питание составляет 10–30 % от общего речного стока.

Ледовые явления наблюдаются в октябре–ноябре. Река замерзает примерно с 25 ноября по 11 декабря. Средняя толщина льда на реке к концу зимы – 40–50 см. В суровые зимы толщина льда достигает 70–80 см.

Экология и природопользование
Шамиурина Е.Н., Куракова А.А., Коноплев А.В., Голосов В.Н.

В такие зимы река может промерзнуть до дна. Средняя температура в реке в наиболее теплом месяце июле +17,5–20,5 °С. Максимальная температура воды в реке может достигать +30 °С и более [44]. Периодически на реке в период половодья могут возникать ледовые заторы.

Река Теча на большем протяжении меандрирует (коэффициент извилистости колеблется от 1,18 до 1,33). Только в верховьях (на заболоченном участке от П-11 ТКВ до с. Муслюмово) и на отдельных участках в среднем и нижнем течении разветвляется на рукава. Дно реки в верхнем течении – торфянисто-илистое, неровное, с пlessами глубиной до 5 м, в среднем течении – на плесах песчаное, неплотное, у берегов суглинистое. Донные отложения р. Течи преимущественно песчаные, встречаются также песчано-илистые, илистые и торфянистые [52].

Питание р. Исети также происходит за счет талых снеговых вод и дождей в летне-осенний период. Замерзает обычно в октябре, вскрывается в апреле. Весенне половодье обычно начинается в конце марта – начале апреля и может продлиться 1–1,5 месяца; межень длительная, низкая и маловодная. На основе данных о стоке р. Исети за последние 30 лет прошлого века было выявлено, что наблюдался рост как среднегодовых расходов воды реки, так и по сезонам, причем больший и достоверный рост происходил в период зимней межени [17].

В целом для р. Исети характерны скорости течения 0,1–0,5 м/с, ширина русла реки изменяется от 40 до 120 м, глубины на перекатах колеблются 0,6–1 м, на плесах до 5 м. В её нижнем течении в пределах Курганской области средняя скорость течения изменяется в пределах 0,12–0,32 м/с, при средней ширине русла 47–96 м, средние глубины составляют 0,6–0,82 м.

Преобладающим типом для р. Исети является меандрирующее русло (коэффициент извилистости в пределах Курганской области – 1,01–2,57) с песчаными и илистыми побочными и перекатами. В верхнем течении река зарегулирована несколькими водохранилищами; в нижнем (ниже г. Шадринска) на фоне расширения поймы реки до 3–5 км русло реки образует раздвоенное русло, рукава которого также меандрируют. Донные отложения р. Исети преимущественно песчаные, в значительно меньшей степени присутствуют участки с песчано-илистыми и илистыми грунтами [52].

Водосборы и поймы рек Теча и Исеть

Для рек ОИБ в пределах Западно-Сибирской равнины характерно абсолютное преобладание пойм с сегментно-гравийным рельефом; реже, на участках, где руслоформирующий расход Q_f проходит при затопленной пойме, рельеф становится проточно-гравийным (например, у левобережных притоков р. Тобол, стекающих с восточного склона Урала) [56].

Верхняя часть бассейна р. Течи расположена в предгорной зоне Южного Урала и покрыта смешанным лесом, средняя и нижняя части – в пределах Предтургайской равнины – частично распаханы, а также заложены степными травами, чередующимися с березовыми колками. На междуречных пространствах большое количество озер. По особенностям строения долины и русла, а также характеру затопления поймы р. Течи можно разделить на три участка [2] (табл. 3).

Таблица 3
Table 3

Характеристика участков поймы р. Течи
Characterization of the Techa River floodplain areas

Длина участка	Участок	Пойма
Исток – 81 км	Исток (П-11) – с.Муслюмово (Челябинская обл.)	Двухсторонняя, шириной 2–2,5 км (варьирует от 3,5 до 0,12 км в конце участка). Поверхность заболоченная, кочковатая, торфянистая, затапливается ежегодно во время половодья слоем 0,2–1 м и до 2 м в высокое половодье. Глубина реки 0,3–0,8 (перекаты), 5м (плесы). Здесь расположены Асановские болота (около 3–4 км от П-11) протяженностью 10 км и шириной около 2 км.
81–141 км	с.Муслюмово – с.Нижнепетропавловское (Челябинская обл.)	Двухсторонняя, асимметричная, шириной 0,3–0,4 км (варьирует от 0,7 км в районе с. Лобаново до 0,035 км). Затапливается пойма слоем 0,5–2,5 м. Поверхность, занятая луговой или кустарниковой растительностью, слагается супесчаными грунтами.
141–243 км	с. Нижнепетропавловское – устье (пос. Затеченское, Курганская обл.)	Двухсторонняя, шириной от 0,4 км (варьирует от 0,1 до 0,7 км). Сухая, с развитой луговой, местами кустарниковой растительностью, суглинистая. Сезонно затапляемые участки поймы располагаются на расстоянии 40–50 м от русла. В обычное половодье пойма затапливается на слой 0,7–2,5 м, а в высокое – до 3,5 м.

На всем протяжении реки пойма занята сосновыми посадками, а также разнотравно-бобовыми и разнотравно-злаковыми ассоциациями, где луговая растительность встречается наряду с лугово-степной [35].

Бассейн р. Исети в верхнем течении расположен в пределах преимущественно залесённой (за исключением селитебных территорий) части восточного склона Южного Урала, и здесь долина р. Исети узкая со скалистыми

Экология и природопользование
Шамиурина Е.Н., Куракова А.А., Коноплев А.В., Голосов В.Н.

берегами, русло порожистое, перегорожено плотинами малых ГЭС и зарегулировано несколькими прудами и водохранилищами. В среднем и нижнем течении река протекает на границе лесной и лесостепной зон. В этой части бассейна возрастает доля пахотных земель. В равнинной части днище долины реки широкое с двусторонней поймой местами расширяющейся до 5 км, на которой встречаются многочисленные пойменные протоки, озера и старицы, а поверхность поймы в основном залужена и закустарена.

По имеющимся данным (табл. 4), пойма р. Исети регулярно затапливается на 7–45 дней на различных участках.

Таблица 4
Table 4

Частота затопления среднего уровня поймы р.Исети на разных участках по длине реки (по [52])
Frequency of flooding of the average floodplain level of the Iset River at different sections along the river length
(according to [52])

Створ	Частота затопления 1 раз в лет	Продолжительность затопления, дни	
		средняя	наибольшая
г. Катайск	2	7,5	16
г. Шадринск	4	8,5	13
пгт. Мехонское	4	16	45

Особенности почвенного покрова поймы реки Течи

На самой низкой пойме р. Течи сформировались луговые легкосуглинистые слаборазвитые почвы мощностью 15–40 см [36], а также встречаются песчаные разновидности. На средней и высокой пойме располагаются аллювиально-слоистые суглинистые задернованные и пойменно-луговые почвы, в формировании которых участвует дерновый и болотный процессы. Слоистость в данных почвах образуется за счет периодического привноса и отложения взвешенных наносов в период половодья. Для пойменных почв р. Течи характерны реакция среды (рН водной суспензии) близка к нейтральной, слабая дифференциация по глубине гумуса и суммы обменных оснований. Некоторые особенности почвенного покрова поймы реки Течи – в частности, песчаный состав почв низкой поймы, который не препятствует фильтрации воды, усиливают вертикальную миграцию техногенных радионуклидов с вертикальным током воды. Особенностью всех пойменных почв является формирование ландшафтно-геохимических барьеров, на которых аккумулируются многие макроэлементы, в том числе и радионуклиды [37]. В то же время, высокий уровень залегания грунтовых вод и сезонное переувлажнение могут менять параметры миграции радионуклидов и способствовать переходу в обменную форму [23, 25].

Особенности поведения техногенного ^{137}Cs в воде рек Теча и Исеть

в отдаленный период после аварийных инцидентов

Точные данные о радионуклидном составе ЖРО в период наиболее интенсивных сбросов в гидрографическую сеть с 1949 по 1951 гг. отсутствуют в связи с отсутствием регулярного радиационного контроля. Также возникают трудности с интерпретацией данных контроля, в связи с устаревшими методами и технологическими особенностями измерения радионуклидов.

В водоем В-3 (рис. 2Б) по данным авторов [2] за 1949–1956 гг. было сброшено порядка 350 кКи активности ^{137}Cs . Ю.Г. Мокровым [34] был реконструирован исходный радионуклидный состав ЖРО в период с 1949 по 1954: в выбросах аварийного характера содержалось 0,35 % ^{137}Cs , а в регламентных сбросах – 0,178 % ^{137}Cs от общего объема, в том числе короткоживущих радионуклидов, которые на тот момент составляли основную долю радиоактивного загрязнения.

Реконструкция сбросов ЖРО, проведенная Мокровым Ю.Г [27] показала, что за 1949–1954 гг. недалеко от точки сброса ЖРО (П-4, створ п. Метлино) сток составил 47,6 кКи ^{137}Cs в составе взвешенных частиц и в растворенном состоянии. В створе с. Муслюмово сток ^{137}Cs составил 5,6 кКи [34]. Следовательно, 42 кКи было переотложено в днище долины р. Течи (на пойме и в русле реки) в пределах участка от места сброса ЖРО до с. Муслюмово.

В таблице 5 представлены данные по годовой реконструкции стока активности в створе П-4 (близ непосредственного места сброса ЖРО) и в створе близ с. Муслюмово, расположенного примерно в 65 км от места сброса. Максимальные сбросы ЖРО наблюдались в 1951 году, а активность ^{137}Cs изменялась в створах не пропорционально, что является важным показателем роли вторичного загрязнения с участков поймы и донных осадков, расположенных выше по течению от с. Муслюмово, в формировании плотности загрязнения вод р. Течи.

Экология и природопользование
Шамиурина Е.Н., Куракова А.А., Коноплев А.В., Голосов В.Н.

Таблица 5
Table 5

Сток активности ^{137}Cs жидким и твердым стоком в створах П4 и с.Муслюмово [34]
 ^{137}Cs activity flux by liquid and solid runoff in П 4 and Muslyumovo sites [34]

Год	Плотина в устье р.Течи (П-4), кКи	с. Муслюмово	П4/Муслюмово, %
1949	0,0924	0,0051 кКи = $1,900 \times 10^8 \text{Бк/л}$	5,3
1950	6,33	0,378 кКи = $1,400 \times 10^{13} \text{Бк/л}$	6
1951	38,5	3,67 кКи = $1,360 \times 10^{14} \text{Бк/л}$	9,5
1952	2,33	0,773 кКи = $2,860 \times 10^{13} \text{Бк/л}$	33,2
1953	0,274	0,406 кКи = $1,500 \times 10^{13} \text{Бк/л}$	148,2
1954	0,125	0,35 кКи = $1,295 \times 10^{13} \text{Бк/л}$	280

По данным измерений, проводимых лабораториями ПО Маяк с середины 1960-х гг. в двух створах на р. Тече, наибольшее снижение объемной активности ^{137}Cs в речной воде произошло в середине 1970-х гг. (табл. 6), причем это резкое снижение связано видимо со аномально низким годовым водным стоком. В этот год отсутствовало половодье, в результате которого происходит обогащение речной воды взвешенными наносами с Асановских болот. Подобный уровень объемной активности ^{137}Cs в речной воде стал наблюдаться только в середине- конце 1990-х гг.

Таблица 6
Table 6

Изменение водного стока и объемной активности ^{137}Cs в воде в среднем (с. Муслюмово) и нижнем (с. Першинское) течении р. Течи за период 1973–2000 гг (по данным [7])

Changes in water flow and ^{137}Cs volumetric activity in water in the middle (Muslyumovo village) and lower (Pershinskoye village) reaches of the Techa River for the period 1973–2000 (according to [7])

Годы	Муслюмово			Першинское		
	Q , млн м ³ /год	^{137}Cs , Бк/л	R , ТБк/год (Ки/год)	Q , млн м ³ /год	^{137}Cs , Бк/л	R , ТБк/год (Ки/год)
1973	77,4	4	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	0,7	0,007 (0,18)	21,2	0,044	0,0009 (0,026)
1982	19,6	1	0,02 (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)	–	–	–

В 1990-х годах был оценен баланс ^{137}Cs в среднем и верхнем течении р. Течи. Поступление ^{137}Cs через ЛБК и ПБК до 1997 года по оценкам международных экспертов не превышало 0,5 Ки/год [63]. По оценкам запас радионуклида от П-11 до с. Муслюмово составлял 5700 Ки, а от с. Муслюмово до с. Першинское 450 Ки [9, 10]. По другим данным, 4200 и 450 Ки [15]. Через створ Муслюмово поступало ежегодно в среднем 1–5 Ки, а через створ Першинское в р. Исеть удалялось 0,2–0,5 Ки. За счет полураспада радионуклида уменьшение запасов происходило в средней части долины на 130 (1991 г.) – 100 (2005 г.) Ки, а в нижней части долины на 9 Ки. Следовательно, в среднем течении Течи происходили и происходят более интенсивные процессы выноса радионуклида с речным стоком, а в нижнем течении уменьшение радионуклида за счет полураспада компенсируется поступлением с речным стоком.

На основе многолетних наблюдений [16] за содержанием ^{137}Cs в речных водах, осуществляемых НПО «Тайфун» и Уральским УГМС, в 2 пунктах (с. Муслюмово и с. Першинское) на р. Тече, и в 3 пунктах (с. Красноисетское, г. Шадринск и пгт. Мехонское) на р. Исеть (рис. 2А) можно судить о том, что среднегодовая объемная активность ^{137}Cs в воде исследуемых рек выше фоновых значений на реках России (0,002 Бк/л), но существенно ниже значений уровня вмешательства по НРБ-99/2009 (11 Бк/л) [35] (рис. 4). Обращает на себя внимание некоторое увеличение среднегодовой объемной активности ^{137}Cs в воде в 2004–2005 гг., что может быть связано как с особенностями формирования стока в эти годы, так и с различиями в методике отбора и анализа проб, которые в этот период проводились в НПО «Тайфун» [40]. Отдельного внимания заслуживает выявленная высокая по сравнению с р. Исетью ниже впадения р. Течи (пост Красноисетское) среднегодовая объемная активность ^{137}Cs в р. Миасс (рис. 4), водосбор которой минимально затронут площадными загрязнениями после аварий на ПО «Маяк» (рис. 2А), однако испытывает сильное влияние промышленных производств Челябинска, Миасса и Карабаша, через которые протекает.

Экология и природопользование
Шамиурина Е.Н., Куракова А.А., Коноплев А.В., Голосов В.Н.

Наблюдается снижение активности ^{137}Cs в воде в 5–10 раз вниз по течению реки Течи от пункта Муслюмово до пункта Першинское (рис. 5) за счёт разбавления речной воды чистыми водами притоков и грунтовыми водами. Согласно официальным данным, на текущий момент отсутствует непосредственный сброс ЖРО в открытую гидрографическую сеть. Миграция радионуклидов в речную воду в настоящее время осуществляется посредством фильтрации из водоемов ТКВ, ЛБК и ПБК, а также через смык осадками и пойменными водами с Асановских болот и загрязненной поймы в верховьях реки. В 2011 году в воде В-1 ТКВ содержалось 0,6–1,3 Бк/л ^{137}Cs , а в донных отложениях – 30000–160000 Бк/кг [3], тогда как в воде р. Течи у с. Муслюмово содержание ^{137}Cs составляло чуть больше 0,2 Бк/л.

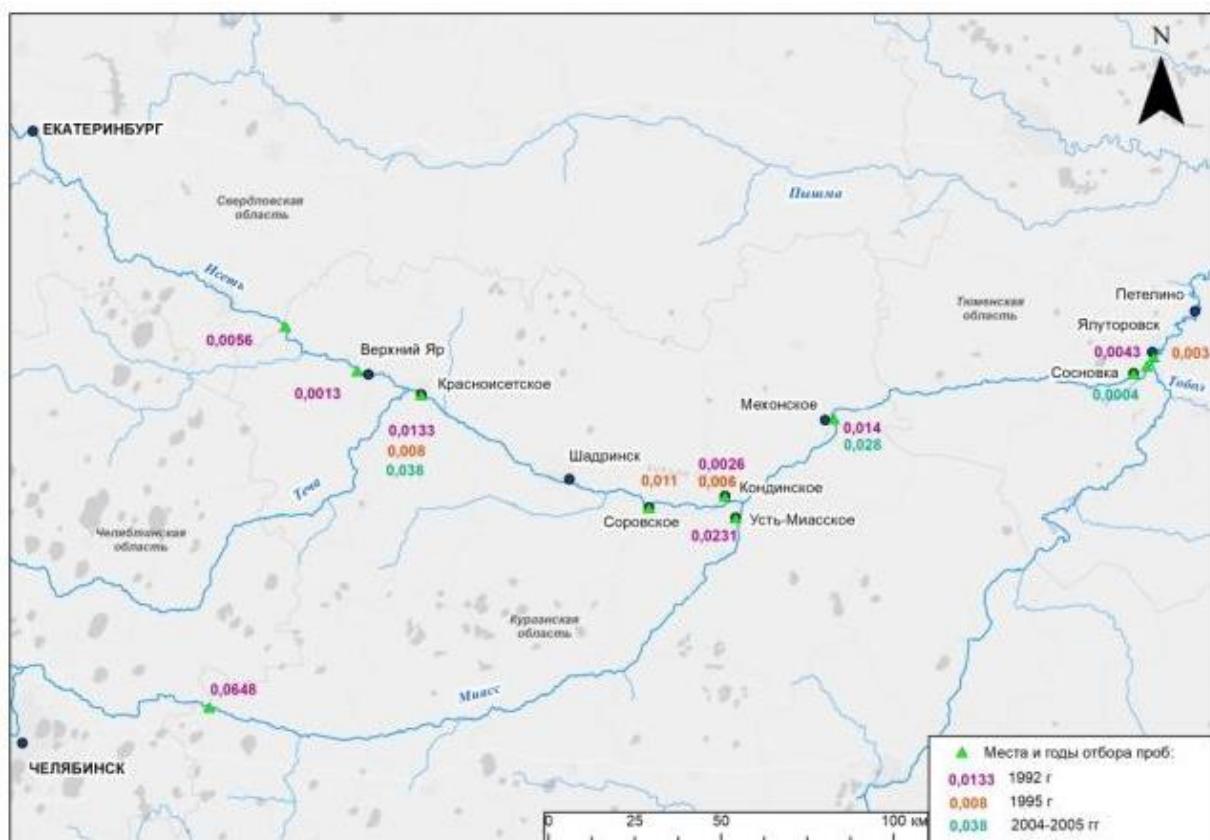


Рис. 4. Объемная активность ^{137}Cs в воде рек бассейна Исети (по данным [40, 53])
 Fig. 4. ^{137}Cs volumetric activity in the water of the rivers of the Iset basin (according to [40, 53])

Снижения объемной активности ^{137}Cs по течению р. Исети не происходит – среднегодовые уровни в различных пунктах отбора на р. Исети достаточно близки между собой (рис. 5). С 2012 года среднегодовые уровни не превышают (за исключением среднегодовых уровней 2021 г. на пункте у н.п. Красноисетское) 0,02 Бк/л. Относительно высокое значение среднегодовой объемной активности речной воды в 2021 году наблюдается только у н.п. Красноисетское, ниже и выше по течению реки, подобных всплесков активности не наблюдалось.

Внутригодовое распределение объемной активности ^{137}Cs в р. Тече у с. Муслюмово с 2020 по 2023 гг. связано с гидрологическим режимом реки. В зимнюю межень наблюдаются максимальные значения (0,2–0,45 Бк/л), а в конце половодья наблюдаются минимальные значения с низкой вариабельностью (0,09–0,12 Бк/л) (рис. 6А). Подобное внутригодовое распределение объемной активности с 2010 по 2013 гг. характеризуется схожими тенденциями, однако разброс значений в зимнюю межень выше – от 0,3 до 0,7 Бк/л (рис. 6Б). Ранее в период 2004–2009 гг общая тенденция внутригодового распределения похожа, но в 2004 году наблюдались высокие уровни в августе и в апреле (рис. 6В).

В зимнюю межень в 2022 году максимальное значение не превышало 0,45 Бк/л, а в 2023 – 0,2 Бк/л, а минимальное значение в летнюю межень снизилось до 0,07 Бк/л, но все же превышало фоновый уровень в 35 раз. В 2023 году максимальное значение составляло 0,22 Бк/л.

Экология и природопользование
Шамиурина Е.Н., Куракова А.А., Коноплев А.В., Голосов В.Н.

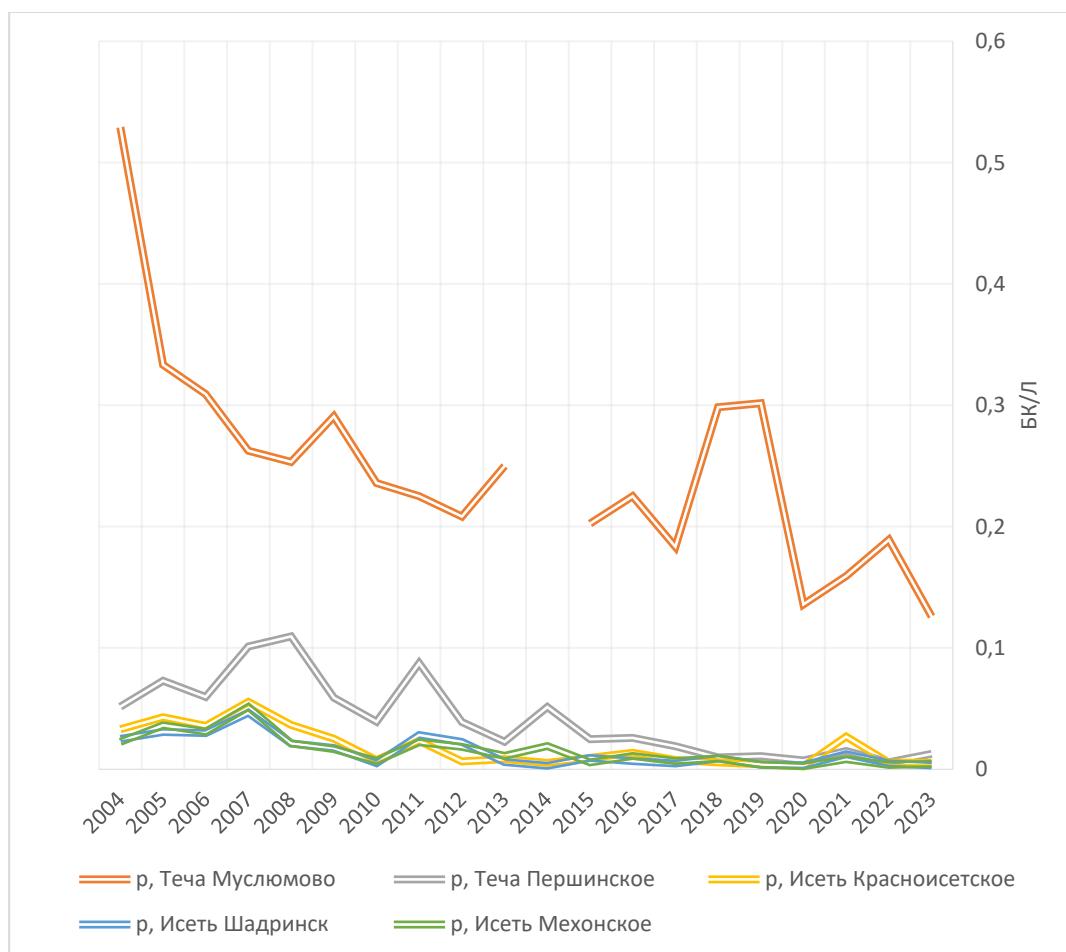


Рис. 5. Среднегодовая объемная активность ^{137}Cs – в воде рек Теча и Иsetь на постах мониторинга (по данным [16]), положение постов на реках на рис. 2А

Fig. 5. Average annual volumetric activity of ^{137}Cs in the waters of the the Techa and Iset rivers at the monitoring stations (according to [16]), location of the stations on the rivers is given in Fig. 2A

За практически 20 лет наблюдений произошло существенное снижение уровня загрязнения вод р. Течи (рис. 7А), прежде всего за счет распада ^{137}Cs , так и за счет процессов регулирования и контроля за экологической ситуацией на ПО «Маяк».

В нижнем течении р. Течи (п. Першинское) уровни содержания ^{137}Cs изменяются несколько иначе в течение года (рис. 7Б). При общей меньшей внутригодовой вариабельности максимумы приходятся на период весеннего половодья и наиболее дождливый месяц года июль. Но в последние годы (2020–2023 гг.) внутригодовая вариабельность значений данного показателя существенно понизилась. Это может быть связано с тем, что абсолютное количество радионуклида в воде снизилось до уровней, когда для его точного измерения требуется большие объемы отобранного образца и длительное время экспозиции, что иногда сложно осуществить в режиме мониторинговых наблюдений.

В речной воде р. Иsetи по мере удаления от места впадения р. Течи не происходит разбавления, уровни загрязнения в разных точках отбора практически не отличаются (рис. 8). Высокая внутригодовая вариабельность измеренных значений за разные периоды и на разных постах вероятно обусловлена недостаточной точностью проведённых анализов, либо различиями в отборе проб воды на разных участках.

Экология и природопользование
Шамиурина Е.Н., Куракова А.А., Коноплев А.В., Голосов В.Н.

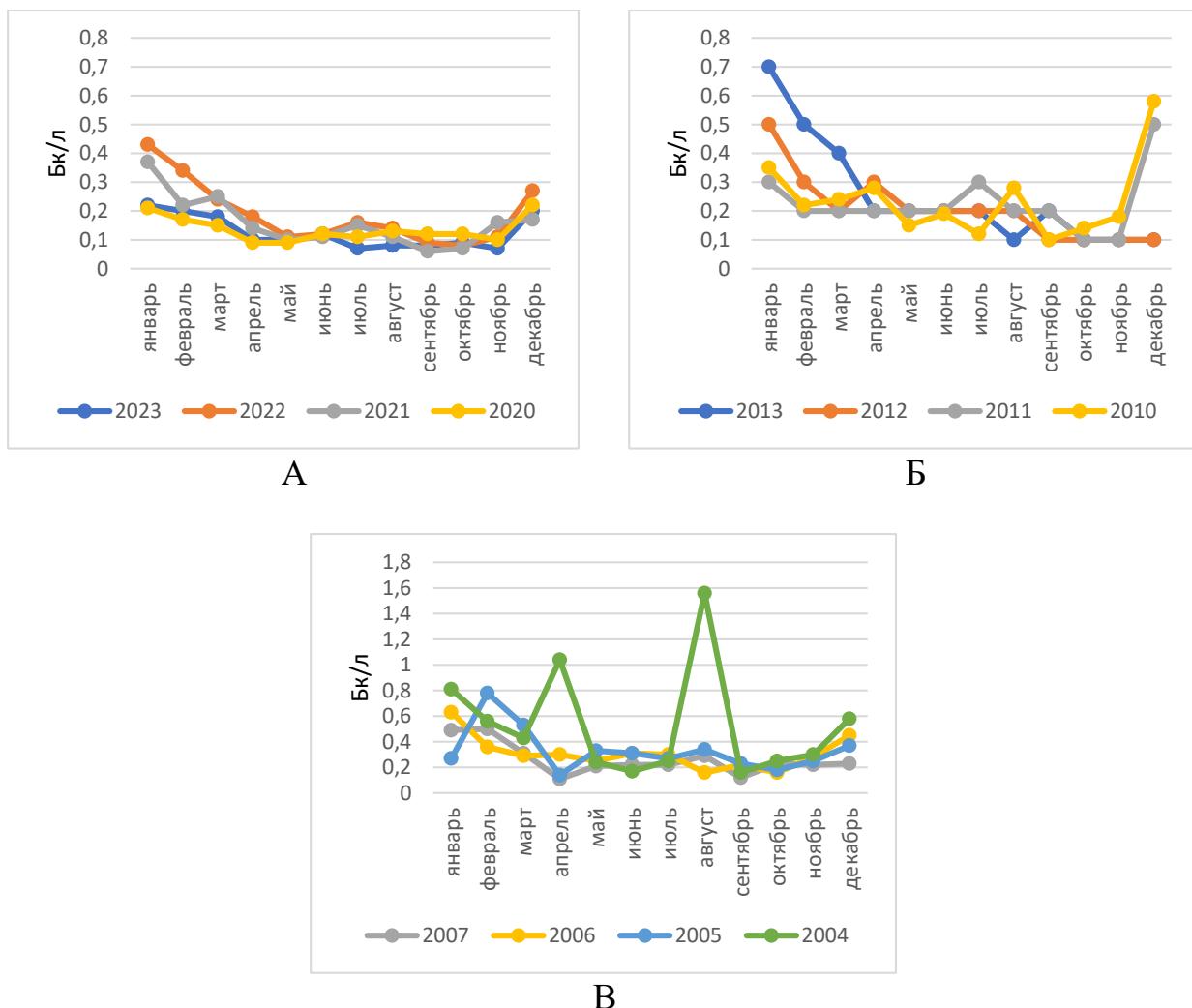


Рис. 6. Внутригодовые изменения объемной активности ^{137}Cs в воде р.Течи у с. Муслюмово

А – с 2020 по 2023 гг., Б – с 2010 по 2013 гг., В – с 2004 по 2009 гг. (по данным [16])

Fig. 6. Intra-annual changes in the ^{137}Cs volumetric activity in the water of the Techa River near Muslyumovo village
 А – from 2020 to 2023, Б – from 2010 to 2013, В – from 2004 to 2009 (according to [16])

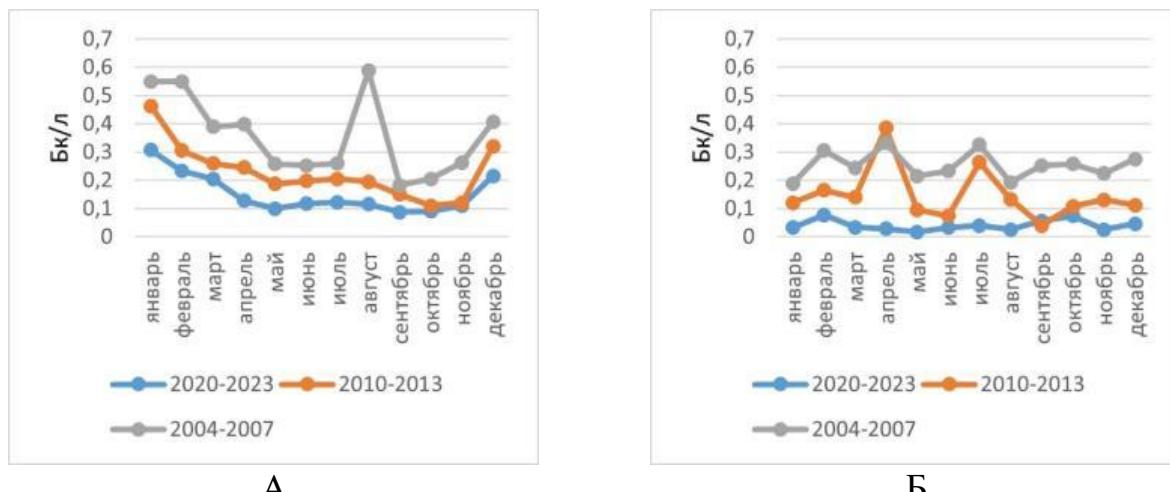


Рис.7. Среднемноголетняя внутригодовая изменчивость объемной активности ^{137}Cs в воде р. Течи
 за различные периоды наблюдений А – Муслюмово, Б – Першинское (по данным [16])

Fig.7. Average long-term intra-annual variability of ^{137}Cs volumetric activity in the water of the Techa River for different observation periods: А – Muslyumovo, Б – Pershinskoye (according to [16])

Экология и природопользование
Шамиурина Е.Н., Куракова А.А., Коноплев А.В., Голосов В.Н.

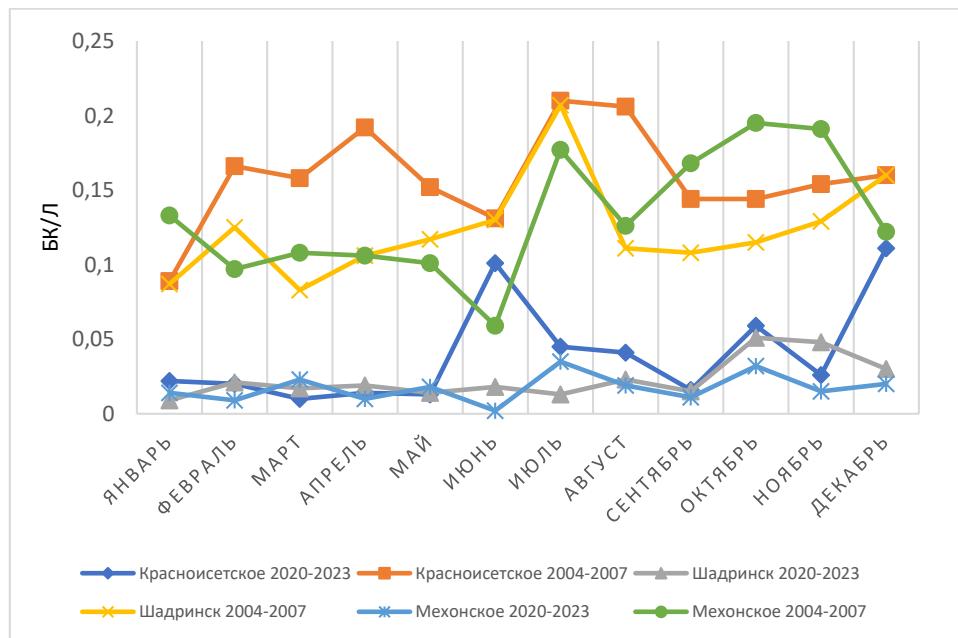


Рис. 8. Средняя внутригодовая изменчивость объемной активности ^{137}Cs в воде р.Исети за различные периоды (2004–2007 гг и 2020–2023 гг) наблюдений в точках отбора с. Красноисетское, г. Шадринск, пгт. Мехонское (по данным [16])

Fig. 8. Average intra-annual variability of ^{137}Cs volumetric activity in the water of the Iset River for different periods (2004–2007) and (2020–2023) of observations at the sampling points Krasnoisetskoye, Shadrinsk, Mekhonskoye (according to [16])

Особенности поведения ^{137}Cs в почве пойм рек Теча и Иsetь

Одним из источников вторичного поступления радионуклида ^{137}Cs в речной сток в отдаленный период после аварийных выбросов, помимо выпадений радионуклидов из атмосферы, являются почвы пойм, так как пойменные почвы являются не только местом аккумуляции речных наносов, но также при определенных условиях могут служить источником взвеси в период половодья [30]. Объемы седиментации взвешенного вещества рек на поверхности поймы зависят от высоты поймы над меженным уровнем, микрорельефа, степени шероховатости поверхности, типа растительности, продолжительности и интенсивности паводковых процессов, концентрации взвешенного вещества в речном потоке [30]. В отношении ^{137}Cs можно выделить основные процессы, которые будут влиять на его перераспределение и миграцию после попадания на поверхность почвы:

- 1) Закрепление в твердой фазе почв (входит в краевые участки кристаллической структуры глинистых минералов), переход в необменную форму и депонирование на поверхности почвенного профиля.
- 2) Вертикальная миграция необменной формы ^{137}Cs в результате процессов механической миграции.
- 3) Вертикальная миграция по почвенному профилю обменного ^{137}Cs в жидкой фазе в связи с долгопоемным режимом на поймах рек.
- 4) Латеральная миграция необменного ^{137}Cs в результате поднятия и отрыва почвенных частиц с незакрепленной растительностью участков поверхности поймы в составе взвешенных наносов в половодье.
- 5) Переотложение (седиментация) необменного ^{137}Cs в составе взвешенного вещества на других участках поймы.
- 6) Переотложение (седиментация) необменного ^{137}Cs в качестве донных отложений в межень.
- 7) Частичный переход в обменную форму, растворение и вовлечение в речной сток (перенос в этом случае осуществляется на дальние расстояния).

Известно, что ^{137}Cs фиксируется в почве очень быстро, и в модельных экспериментах уже через полчаса после внесения в обменной форме остается от 10 до 30 % от внесенного количества [24, 61]. Количество различных химических форм ^{137}Cs также колеблется в зависимости от типа почв [29]. Самое высокое содержание прочносвязанных форм (фиксированных) ^{137}Cs характерно для автоморфных почв с высоким содержанием глинистых минералов. Важную роль в вертикальной миграции радионуклидов в пойменных почвах играет колматаж и конвективный перенос с водными растворами в поровом пространстве, который идет как с гравитационным потоком воды, направленным вниз по профилю, так и с капиллярным поднятием [5, 35].

Пойма р. Течи подверглась радиоактивному загрязнению в результате сбросов ЖРО начиная с 1949 года, а в 1951 году весной во время аномального половодья произошло загрязнение широкого участка поймы (локально

Экология и природопользование
Шамиурина Е.Н., Куракова А.А., Коноплев А.В., Голосов В.Н.

до 500 м, в среднем 150–200 м, максимум в 1–50 м от уреза) практически на всем протяжении реки [1]. Увеличение степени загрязнения Асановских болот (рис. 2Б) произошло в результате значительных сбросов воды в ходе «промывки» технологических водоемов в октябре 1951 г., в результате чего большое количество взмученных донных отложений, загрязненных радионуклидами, вместе с водой попали в речную систему [1]. В дальнейшем поступление радионуклидов с речными водами на пойму во время половодья продолжилось, но в гораздо меньшем объеме, так как началось регулирование сбросов и строительство плотин (с 1956 года) до полного прекращения поступления радионуклидов в 1964 году в результате строительства водоема В-11 и плотины П-11 ТКВ (рис. 2Б). Данная особенность оказала существенное влияние на характер распределения радионуклидов по вертикальному профилю пойменных почв. Периоды активного сброса жидких радиоактивных отходов (ЖРО) и проведения технологической промывки четко прослеживаются в максимальных активностях ^{137}Cs на различных глубинах по профилю почв, где каждый прослой характеризует определенный гидрологический режим осаждения.

Наиболее загрязненный участок поймы находится в верховьях реки на участке от П-11 до с. Муслюмово (рис. 2Б), а по мере удаления от источника выброса, уровни загрязнения снижаются [38].

Важную роль в вертикальной миграции ^{137}Cs в пойменной почве может играть степень увлажнения почвы, так как содержание влаги в почве может оказывать влияние на содержание подвижных форм, способных к вертикальной миграции, при схожести основных физико-химических свойств почв. Общее количество радионуклидов в растворе в значительной степени возрастает по мере увеличения увлажнения почв. При значении КО=2 (коэффициент обводненности – соотношение объема воды и массы почвы) подвижность ^{137}Cs приближается к ^{90}Sr , тогда как при КО=0,2 подвижность ^{137}Cs существенно ниже, чем у ^{90}Sr [53]. Подобную картину описывают и другие авторы при значении КО>1 и связывают это с влиянием растворенного органического вещества почвы в почвенной суспензии [23]. Но подобная влажность характерна только для заболоченных участков пойм.

В модельном эксперименте с образцами пойменной почвы (при pH менее 4), отобранный в районе Асановских болот, было показано, что с увеличением длительности обводнения почвы повышается переход в подвижную форму ^{137}Cs [20].

На основании анализа массива послойек [22], отобранных в районе Асанова моста (рис. 2Б), можно сделать вывод только об уменьшении общих запасов ^{137}Cs по мере удаления от русла реки. Наличие нескольких пиков активности на разных глубинах характеризует наличие нескольких эпизодов сбросов ЖРО в различные годы. Большая глубина проникновения радионуклида говорит о большой подвижности ^{137}Cs в условиях периодического сезонного затопления заболоченной поймы. К сожалению, никаких данных о геоморфологической позиции (превышении над уровнем воды), описание почв со строением профиля, растительности в районе отбора проб, что могло бы помочь в интерпретации данных авторы исследования не привели.

Распределение радионуклида в болотной почве в 2 км ниже Нового моста (правый берег, 3 м от русла) характеризуется пиком максимальной активности ^{137}Cs на глубине 30 см ($0,9 \times 10^6$ Бк/кг). В серии послойек, отобранных на правом берегу ниже Надырова моста (5–20–50 м от русла) в 5 м от русла и далее наблюдается похожее распределение радионуклида в почве – максимум отмечается в верхних 10 см, далее резкое снижение значения на глубине 30 см и достаточно равномерное распределение до 100 см. По мере удаления от русла, запасы снижаются. Для более точной и корректной интерпретации полученных данных важно не удаление от русла, а превышение над руслом, потому как важную роль играет форма поверхности поймы.

На незаболоченных участках поймы наблюдается иная ситуация с вертикальным распределением ^{137}Cs по почвенному профилю. Так в пробах дерновой почвы, отобранный на низкой пойме выше с. Муслюмово (правый берег, 2 м от русла), максимальное содержание ^{137}Cs наблюдается на глубине 50 см ($1,6 \times 10^4$ Бк/кг) и присутствует только один пик [22]. В данном случае заглубление пика связано с аккумуляцией наносов на низкой пойме, примыкающей к руслу со скоростью почти 1 см/год.

В 1993–2003 гг. на пойме р. Течи проводились многолетние комплексные исследования (почва, вода, растительность) по оценке миграции и трансформации уровней загрязнения сотрудниками Института экологии растений и животных УрО РАН [36]. На пойме в среднем и нижнем течении р. Течи от Муслюмово до Затеченского, а также на участке р. Исети после впадения р. Течи были заложены 11 реперных участков, где провели профильное обследование прирусовой и центральной поймы, надпойменной террасы и междуречного пространства, что позволило оценить распространение загрязнения в пойменном ландшафте вдоль реки, по ширине поймы и по глубине почвенного профиля. Данная работа подтвердила ранее полученные выводы о снижении запасов радионуклида в пойменных почвах по мере удаления от верховья р. Течи [50].

Согласно исследованию [63], количество ^{137}Cs в пойме рек Теча и Исети было определено на уровне 198 ТБк, в то время как в водной среде и донных отложениях р. Течи авторы оценили запас лишь 6 ТБк. Также было выяснено, что в процессе паводкового поверхностного и внутрипочвенного стока в реку может поступать 0,01 % от общего запаса цезия в почве. В качестве недостатка этой работы можно указать то, что послойный отбор образцов почвы осуществляли через 5 см до глубины 30–40 см, так как часто это было границей залегания верховодки/грунтовых вод, а снижение распределение ^{137}Cs по профилю почв описывали экспоненциальным законом, что не подтверждается проведенными исследованиями в экстремально загрязненных участках поймы р. Течи в её верхнем течении. Также, несмотря на закладку разрезов по уровням поймы, высотные отметки разных уровней на протяжении участка обследования не были определены.

Экология и природопользование
Шамиурина Е.Н., Куракова А.А., Коноплев А.В., Голосов В.Н.

Картирование уровней загрязнения (масштаб карты 1:500 000) в начале 90-х гг XX века пытались провести на основе аэрогаммасъемки [20, 21]. Из-за большого масштаба осреднения, сравнивать данные аэрогаммасъемки с полевыми измерениями часто не представляется возможным. На примере поймы р. Течи данные по запасам ^{137}Cs , полученные по результатам аэрогаммасъемки, могут быть ниже данных полевых обследований в 10 раз.

После аварии на ЧАЭС радиоэкологическое картографирование загрязненных территорий России стало проводиться с учетом ландшафтной структуры территории [20].

Крупномасштабное радиационное картографирование загрязнения поймы р. Течи вблизи крупных населенных пунктов было проведено в 1994–1996 годах (при поддержке МинЧС) с использованием переносного радиометра Корад, который позволял измерять запас радионуклида с учетом его заглубления [8–10, 59]. Калибровали полученные данные с помощью пробоотбора почвы на ключевых площадках. Основной целью данного картирования было ограничить участки с площадью загрязнения 1 КИ/км². В результате этих исследований были получены карты распределения плотности загрязнения ^{137}Cs [9, 10, 59], а также установлена связь радионуклидного загрязнения с ландшафтно-геоморфологическим строением поймы [8, 26–29].

Проведенные в 1994–1996 годах комплексные исследования, в ходе которых было получено более 30 тысяч измерений содержания цезия в почве, представляют собой уникальные крупномасштабные исследования распределения радионуклидов в пойменном ландшафте, которые до сих пор находятся в процессе осмысливания и анализа. Эти исследования позволили провести детальное изучение ландшафтной дифференциации ^{137}Cs на различных уровнях организации поймы [8, 26–29].

До аварии на Чернобыльской АЭС роль ландшафтных факторов в распределении радионуклидов оставалась недостаточно изученной, поскольку ландшафтные методы исследований в радиоэкологии практически не применялись [26]. Закономерности миграции радионуклидов определяются структурой рельефа, почвенного покрова и растительности. При этом для изучения поля радиоактивного загрязнения в пределах пойм необходимо учитывать гидрологические характеристики самой речной сети.

Были показаны зависимости запаса радионуклида в почве от гипсометрического уровня поймы [8–10, 29]. Факторы, которые также влияли на уровни загрязнения: извилистый характер русла, наличие задерживающей течение растительности и пересыхающие речные протоки. Также дороги и пешеходные тропы оказывали аккумулирующее и растягивающее влияние на ареалы загрязнения.

Исследования, проведенные на территории ВУРСа в пойме р. Исети и в устье р. Каменка [35, 54], показали, что в зависимости от положения в ландшафте вертикальное распределение по профилю ^{137}Cs различается: в прирусовых частях поймы происходит заглубление пика максимального содержания радионуклида до 20 см, что авторы связывают с процессами перемещения радионуклида в составе твердого и жидкого стока, так и с дополнительным поступлением во время сезонного затопления. Авторы полагают, что высокие темпы вертикальной миграции и относительно равномерное распределение (без пика в самых верхних см профиля) характерны для всех прибрежных обследованных участков, так как они находятся в зонах повышенного увлажнения. Максимальное содержание ^{137}Cs обнаружено в аллювиально-слоистых почвах прирусовой поймы р. Исети. На самом деле, основной причиной существенного прироста запасов ^{137}Cs на низкой пойме, расположенной рядом с руслом, являются высокие темпы аккумуляции наносов, характерные для регулярно затапливаемых участков низкой поймы [8, 10, 11]. Изменение содержания ^{137}Cs по глубине в отложениях низкой поймы характеризует изменения его содержания в стоке наносов реки во времени.

Опубликованные оценки вертикального распределения ^{137}Cs в пойменных отложениях р. Течи на участках в днищах долины, расположенных на различном удалении от водоёмов НПО «Маяк», показывают, что на начало 1990-х годов отложилось от 5 до 20 см [52]. К сожалению, отбор проб проводился через 5 см, не приведена высотная привязка точек отбора относительно уреза. Была разработана модель SURON, позволяющая рассчитывать суммарные запасы накопления ^{137}Cs на пойме р. Течи [57]. Верификация результатов расчётов на фактических данных показала, что она завышает запасы в истоках реки и занижает в низовьях.

До середины 1990-х годов не существовало единой карты радиоактивного загрязнения территории в результате деятельности ПО Маяк, поэтому была принята Федеральная целевая программа «Преодоление последствий радиационных аварий на период до 2010 г.» продленная до 2015 года, в которой принимали непосредственное участие Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, МЧС России, Уралгидромет, Челябгидромет, НПО «Тайфун». Карты, размещенные в Атласе [2], для поймы рек Теча и Исеть разработаны на основе послойного отбора проб до глубины 1,5 м и приведены к 2007 году. Отбор проводился с помощью механизированного проотборника, позволяющего отбирать пачку отложений мощностью до 1 м. Для участка поймы р. Течи в пределах Челябинской области – Асановские болота – была построена карта загрязнения с границами 1–70 и 70–150 КИ/км² (табл. 7). Для остального участка поймы указаны только точки с максимальными запасами. В пределах Курганской области картирование плотности радиоактивного загрязнения проводили более точно: масштаб карты крупнее, выделяли ареалы с более дробной плотностью загрязнения.

Экология и природопользование
Шамиурина Е.Н., Куракова А.А., Коноплев А.В., Голосов В.Н.

Таблица 7
 Table 7

Площади радиоактивного загрязнения пойм рек Течи и Исети
 с разной плотностью радиоактивного загрязнения
 Areas of radioactive contamination of the Techa and Iset river floodplains
 with different densities of radioactive contamination

<i>Пойма Течи в Челябинской области – Асановские болота (масштаб карты 1:75 000) 2012 год обследования</i>	
<i>Плотность загрязнения, Ки/км²</i>	<i>Площадь, км²</i>
1-70	19,5
70-150	21,3
<i>Пойма Течи в границах Курганской области (масштаб карты 1:50000) 1998 год обследования</i>	
<i>Плотность загрязнения, Ки/км²</i>	<i>Площадь, км²</i>
0,1-5	31,3
5-10	7,5
10-25	0,54
<i>Пойма Исети в границах Курганской области (масштаб карты 1:50000) 2000–2003 годы обследования</i>	
<i>Плотность загрязнения, Ки/км²</i>	<i>Площадь, км²</i>
0,2-1	47,2
1-2	1,66
2-4	0,35

Выводы и перспективы

Многолетние исследования последствий радиоактивного загрязнения днищ долин бассейна р. Исети в основном проводились радиоэкологами и радиобиологами, которые всесторонне и детально изучали содержание различных радионуклидов, включая ^{137}Cs , в почве, воде, донных осадках. К сожалению, при сборе и анализе полевых данных не всегда достаточное внимание в исследованиях загрязненных участков пойм было уделено анализу гидрологических данных, включая сток воды и наносов, их внутригодовые и межгодовые изменения. В равной степени при проведении работ в днище долин рек Теча и Исеть часто не проводилась детальная топографическая привязка точек отбора проб и геоморфологическое описание участка отбора, а послойный отбор пойменных отложений проводился с интервалом 5 см. Отсутствие данной информации существенно сужает возможности интерпретации полученных данных и ограничивает обоснованность полученных оценок особенностей латеральной миграции и переотложения радионуклидов на различном удалении от основных ареалов загрязнения. Более детально исследована ближняя зона, расположенная в верхнем течении р. Течи, которая характеризуется предельно высокими уровнями радиоактивного загрязнения. Продолжается мониторинг содержания ^{137}Cs в стоке воды рек бассейна Исети. Однако, в последнее десятилетие существенно сократилось внимание к исследованиям особенностей радиоактивного загрязнения днищ долин рек бассейна р. Исети. На фоне происходящих изменений климата и земпользования представляется крайне важным провести цикл исследований по оценке особенностей трансформации поля радиоактивного загрязнения днищ р. Течи в её нижнем течении и р. Исети с учётом особенностей гидрологического режима, типов речных русел и морфологии пойм различного уровня. Сопоставление полученных данных с предшествующими исследованиями, в частности с оценками уровней загрязнения пойм рек Течи и Исети на середину 1990-х и начало 2000-х годов [26, 28] позволит выявить современные тенденции перераспределения радионуклидов, связанные в основном с развитием эрозионно-аккумулятивных процессов без существенного поступления дополнительных порций радионуклидов непосредственно с территории ПО «Маяк».

Библиографический список

1. Аклеева А.В., Киселева М.Ф. Медико-биологические и экологические последствия радиоактивного загрязнения р. Течи. М., 2001. 531 с.
2. Атлас Восточно-Уральского и Карачаевского радиоактивных следов, включая прогноз до 2047 года / под ред. Ю.А. Израэля. М.:ИГКЭ Росгидромета и РАН, 2013. 140 с.
3. Баранов С.В., Баторшин Г.Ш., Мокров Ю.Г. и др. Теченский каскад водоемов ФГУП «ПО «Маяк»: текущее состояние и перспективы // Вопросы радиационной безопасности. 2011. № 1. С. 5–14.
4. Беркович К.М. Обь // Реки и озера мира. Энциклопедия. М., 2012. С. 479–498.
5. Булгаков А.А., Коноплев А.В., Попов В.Е., Бобовникова Ц.И., Сиверина А.А., Шкуратова И.Г. Механизмы вертикальной миграции долгоживущих радионуклидов в почвах 30-километровой зоны ЧАЭС // Почвоведение. 1990. № 10. С. 14–19.
6. Восточно-Уральский радиоактивный след / Под ред. В.Н. Чуканова. Екатеринбург, 1996. 167 с.
7. Глаголенко Ю.В., Дрожжко Е.Г., Мокров Ю.Г. Особенности формирования радиоактивного загрязнения р. Теча // Вопросы радиационной безопасности. 2007. № 2. С. 27–36.
8. Говорун А.П., Линник В.Г. Влияние ландшафтной структуры на распределение цезия-137 в пойме р. Течи // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы 2-ой Международной конференции. Томск, 2004. С. 150–153.
9. Говорун А.П., Чесноков А.В., Щербак С.Б. Особенности распределения Cs-137 и Sr-90 в пойме р. Течи в районе пос. Бродокалмака // Атомная энергия. 1999. Т. 86, вып. 1 С. 63–68.

Экология и природопользование
Шамиурина Е.Н., Куракова А.А., Коноплев А.В., Голосов В.Н.

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. Голосов В.Н., Куксина Л.В., Иванов М.М., Фролова Н.Л., Иванова Н.Н., Беляев В.Р. Оценка перераспределения ^{137}Cs в пойменных отложениях реки Упы (Тульская область) после аварии на Чернобыльской АЭС // Изв. РАН. Сер. геогр. 2020. № 1. С. 67–79. DOI: 10.31857/S2587556620010082
12. Государственный водный кадастр. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. 1 Вып. 11: Бассейн Иртыша. Л: Гидрометеоиздат, 1986.
13. Государственный водный кадастр. Река Исеть. URL:<https://textual.ru/gvr/index.php?card=195865> (дата обращения 03.04.2025)
14. Даванков А.Ю. Оценка ущерба, нанесённого загрязненным территориям аварией 1957 года // Охрана природы Южного Урала: областной экологический альманах. 2007. С. 53–55.
15. Дрожжко Е.Г., Мокров Ю.Г. Теченский каскад водоемов: проблемы безопасности и регулирования // Охрана природы южного Урала: областной экологический альманах. 2008. С. 44–51.
16. Ежегодники «Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2003–2023 г.». СПб.: Гидрометеоиздат, 2004–2024. URL: <https://egasmro.ru/ru/data> (дата обращения 03.04.2025)
17. Забавнова А.А. Сезонный сток рек бассейна Российского Иртыша: выпускная бакалаврская работа по направлению подготовки: 05.03.04 - Гидрология. Томск, 2021. URL:<https://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vital:14939>.
18. Зайков Б.Д. Средний сток и его распределение в году по территории СССР // Тр. НИУ ГУГМС. Сер. IV. Вып. 24., 1946. С. 67–95.
19. Заключение комиссии по оценке экологической ситуации в районе производственного объединения «Маяк», организованной по решению Президиума АН СССР № 1140–501 // Радиобиология. 1991. Т. 31, Вып. 1. С. 436–452.
20. Израэль Ю.А., Квасникова Е.В., Линник В.Г. Радиоактивное загрязнение территории России. В кн.: Изменение природной среды в ХХ веке. М.: МОЛНИЕТ. 2012. С. 202–220.
21. Израэль Ю.А., Назаров И.М., Фридман Ш.Д., Квасникова Е.В. Методика и некоторые результаты авиационной гамма-съемки радиоактивного загрязнения территории европейской части России // Радиоактивные выпадения после ядерных взрывов и аварий: сборник статей. СПб.: Гидрометеоиздат, 1994. 280 с.
22. Казачёнок Н.Н. Геоэкология техногенных радиоактивных изотопов. Могилёв: Белорус.-Рос. ун-т, 2017. 283 с.
23. Караваева Е.Н., Молчанова И.В. Роль некоторых категорий почвенной влаги в вертикальном перемещении ^{90}Sr и ^{137}Cs в почве // Экология. 1979. № 1. С. 48–52.
24. Котова А.Ю., Санжарова Н.И. Поведение некоторых радионуклидов в различных почвах // Почвоведение. 2002. № 1. С. 108–120.
25. Куликов Н.В., Молчанова И.В., Караваева Е.Н. Радиоэкология почвенно-растительного покрова. Свердловск: Уральское отделение АН СССР, 1990. 172 с.
26. Линник В.Г. Ландшафтная дифференциация техногенных радионуклидов. М.: РАН, 2018. 372 с.
27. Линник В.Г. Ландшафтные методы в радиоэкологии // Научные аспекты экологических проблем России: труды Всероссийской конференции. М.: Наука, 2002. Т. 1. С. 364–369.
28. Линник В.Г. Радиоэкологический анализ речных бассейнов в районах влияния предприятий ядерно-топливного цикла // Труды V Международной научно-практической конференции «Экология речных бассейнов» (ERB-2009). Владимир, 2009. С. 60–65.
29. Линник В.Г. Техногенные радионуклиды в поймах р. Теча и среднего течения р. Енисей. // Вестник Московского университета. Сер. 5. География, 2011. № 4. С. 24–30.
30. Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 347 с.
31. Маликова И.Н., Сухоруков Ф.В., Страховенко В.Д., Щербов Б.Л. О неоднородности современного распределения радиоцезия в почвах Западной Сибири // Научный журнал. 2010. № 10-05-00370. С. 56–70.
32. Мирошников А.Ю. Закономерности распределения и накопления радиоцезия в донных осадках Карского моря: автореф. диссертации на соискание учен. степени канд-т геол.-минерал. наук. ФГБУ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН). Москва, 2012. 24 с.
33. Мокров Ю.Г. Реконструкция и прогноз радиоактивного загрязнения реки Теча: автореф. диссертации на соискание учен. степени д-р технических наук. ФГУП «ПО «Маяк». Озерск, 2005. 48 с.
34. 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.
35. Молчанова И.В., Караваева Е.Н. Эколо-геохимические аспекты миграции радионуклидов в почвенно-растительном покрове. Екатеринбург: Изд-во УРО РАН, 2001. 161 с.
36. Молчанова И.В., Караваева Е.Н., Михайловская Л.Н. Радиоэкологические исследования почвенно-растительного покрова. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. ISBN 5-7691-1655-2.
37. Молчанова И.В., Куликов Н.В. Радиоактивные изотопы в системе почва-растение. М.: Атомиздат, 1972. 84 с.
38. Муслюмово: итоги 50-летнего наблюдения / Под редакцией А.В.Аклеева и М.Ф.Киселева. Челябинск, 2001. URL: <http://nuclear.tatar.mtss.ru/of0000011.htm> (дата обращения: 03.04.2025).
39. Национальный атлас России. Природа и экология [Электронный ресурс] / Карты ФГУП «ГОСГИСЦЕНТР». Москва: Роскартография, 2007.
40. Никитин А.И., Крышев И.И., Чумичев В.Б., Крышев А.И., Валетова Н.К., Кабанов А.И., Катрич И.Ю., Рябцев И.А., Пельгунова Л.А., Полякова Н.И., Родин В.М., Мироненко А.Н. Радиоэкологический мониторинг Обь-Иртышской речной системы // Сборник материалов международной конференции «Радиоэкология: итоги, современное состояние и перспективы». 2008. С. 151–167.

Экология и природопользование
Шамиурина Е.Н., Куракова А.А., Коноплев А.В., Голосов В.Н.

41. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. // Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 07.07.2009 №47. Зарегистрировано в Минюсте РФ 14.08.2009 №14534.
42. Отчет по экологической безопасности ФГУП «ПО «Маяк» за 2021 год / Госкорпорация. «Росатом»; ФГУП «ПО «Маяк». Озерск: РИЦ ВРБ; ФГУП «ПО «Маяк», 2022. 65 с.
43. Последствия техногенного радиационного воздействия и проблемы реабилитации Уральского региона / Под общ. ред. С.К. Шойгу. М.: Комтхеопринт, 2002. 287 с.
44. Радиоэкологическая обстановка в регионах расположения предприятий Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» / под общ. ред. И. И. Линге и И. И. Крышева. М., 2021. 555 с.
45. Региональная электронная гидрографическая сеть данных для Арктического региона. URL: <https://www.r-arcticnet.sr.unh.edu/v4.0/index.html> (дата обращения 03.04.2025)
46. Резонанс: Южно-Уральская атомная: быть или не быть? Челябинск: Юж.-Урал. кн. изд-во, 1991. 56 с.
47. Сапожников Ю.А., Алиев В.А., Калмыков С.Н. Радиоактивность окружающей среды. Теория и практика. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 286 с.
48. Силантьев А.Н., Шкуратова И.Г. Обнаружение промышленных загрязнений почвы и атмосферных выпадений на фоне глобального загрязнения. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 136 с.
49. Тарасов О.В. Радиоэкология наземных позвоночных головной части Восточно-Уральского радиоактивного следа: диссер. на соискание учен. степени канд-т биологич. наук. ФГУП «ПО «Маяк». Озерск, 2000. 151 с.
50. Трапезников А.В., Позолотина В.Н., Юшков П.И., Трапезникова В.Н., Молчанова И.В., Караваева Е.Н., Чеботаина М.Я., Ааркрог А., Дальгаард Х., Нильсен С.П., Чен К. Исследование радиоэкологической ситуации в реках Теча и Исеть, за-грязненных сбросами ПО «Маяк» // Проблемы радиоэкологии и пограничных дисциплин: Сборник научных трудов. Екатеринбург; Заречный: Уральский государственный технический университет, 1999. С. 20–66.
51. Трапезников А.В., Трапезникова В.Н., Коржавин А.В., Николкин В.Н. Миграция радионуклидов в пресноводных и наземных экосистемах: в 2 т. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2007. Т. 2. 400 с.
52. Трапезников А.В., Трапезникова В.Н., Коржавин А.В., Николкин В.Н. Радиоэкологический мониторинг пресноводных экосистем, Том I. Екатеринбург: Изд-во «АкадемНаука», 2014. 496 с.
53. Трапезников, А.В., Трапезникова В.Н. Пресноводная радиоэкология. Екатеринбург: «Наука», 2012. 544 с.
54. Фирсова В.П., Молчанова И.В., Мещеряков П.В. и др. Почвенно-экологические условия накопления и перераспределения радионуклидов в зоне ВУРСа. Екатеринбург, 1996. 138 с.
55. Хохряков В.В., Дрожжко Е.Г., Романов Г.Н., Мокров Ю.Г., Кямкин А.М., Волобуев П.В., Воробьева М.И., Костюченко В.А., Аклеев А.В., Челюканов В.В. Характеристика техногенного радиационного воздействия на территорию и население // Последствия техногенного радиационного воздействия и проблемы реабилитации Уральского региона. М., 2002. С. 39–44.
56. Чернов А.В. География и геоэкологическое состояние русел и пойм рек Северной Евразии. Крона Москва, 2009. 654 с.
57. Aarkrog A., Trapeznikov A., Molchanova I., Yushkov P., Pozolotina V., Polikarpov G., Dahlgaard H., Nielsen S. Environmental modelling of radioactive contamination of floodplains and sorlakes along the Techa and Iset rivers // Journal of Environmental Radioactivity, 2000. Vol. 49. Pp. 243–257.
58. Aarkrog A., Tsaturov Y., Polikarpov G.G. Sources to environmental radioactive contamination in the former USSR // Radiation protection. vol.71. European Comission. Directorate – General Environment, Civil Protection and Nuclear Safety. 1994. 62 p.
59. Chesnokov A.V., Govorun A.P., Linnik V.G., Shcherbak S.B. ¹³⁷Cs contamination of the Techa river flood plain near the village of Muslimovo // Journal of Environmental Radioactivity. 2000. Vol. 50. Pp. 179–191. DOI: 10.1016/S0265-931X(99)00110-1.
60. Hirose K. 2011 Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident: summary of regional radioactive deposition monitoring results // Journal of Environmental Radioactivity. 2012. Vol. 3. Pp. 111:13–7. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2011.09.003
61. Konoplev A.V., Bulgakov A.A., Popov V.E., Hilton J., Comans R.N. Long-Term Investigation of ¹³⁷Cs Fixation by Soils // Radiation Protection Dosimetry, 1996. Vol. 64, Pp. 15–18.
62. Playford K. Lewis G.N.J. and Carpenter R.C. Radioactive fallout in air and rain: results on the end of 1989. // Report AEA-EE-0227, DOE/HMIP/PR/91/042, Harwell Laboratories, UK, 1990, 21 p.
63. 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. Osteras, 1997. 134 p.

References

1. Akleyeva A.V., Kiseleva M.F. (2001) Medico-biological and ecological consequences of radioactive contamination of the Techa River, Moskva, Russia
2. Atlas of the East Ural and Karachay radioactive traces, including forecast up to 2047 / Edited by Yu.A. Izrael. Moscow: IGCE of Roshydromet and RAS. Infosphere Foundation - NIA-Priroda, 2013. 140 p.
3. Baranov S.V., Batorshin G.Sh., Mokrov Y.G., et al. (2011) Techenskiy cascade of water reservoirs of FSUE ‘PA Mayak’: current state and prospects, Radiation safety issues, no. 1, pp. 5–14.
4. Berkovich K.M. (2012) Ob, Rivers and Lakes of the World. Encyclopaedia. M., pp. 479–498.
5. Bulgakov A.A., Konoplev A.V., Popov V.E., Bobovnikova C.I., Siverina A.A., Shkuratova I.G. (1990) Mechanisms of vertical migration of long-lived radionuclides in soils of 30-km zone of the Chernobyl NPP, Soil Science, no.10, pp. 14–19.
6. East-Ural radioactive trace / Edited by V.N. Chukanov. Ekaterinburg, 1996. 167 p.
7. Glagolenko, Yu.V., Drozhko, E.G., Mokrov, Yu.G. (2007) Features of the radioactive contamination formation in the Techa River (in Russian), Radiation safety issues, no. 2, pp. 27–36.
8. Govorun A.P., Linnik V.G. (2004) Influence of landscape structure on the spread of cesium-137 in the floodplain of the Techa river, Radioactivity and radioactive elements in human habitat: proceedings of the 2nd International Conference. Tomsk, pp. 150–153.

Экология и природопользование
Шамиурина Е.Н., Куракова А.А., Коноплев А.В., Голосов В.Н.

9. Govorun, A.P., Chesnokov, A.V., Scherbak, S.B. (1999) Peculiarities of Cs-137 and Sr-90 distribution in the Techa River floodplain near the Brodokalmak settlement (in Russian), Atomic Energy, Vol. 86, no. 1, pp. 63–68.
10. Govorun A.P., Chesnokov A.V., Scherbak S.B. (1998) Distribution of Cs-137 in the Techa River floodplain in the vicinity of the village of Muslyumovo, Atomic Energy, Vol. 84, no. 6, pp. 545–550.
11. Golosov V.N., Kuksina L.V., Ivanov M.M., Frolova N.L., Ivanova N.N., Belyaev V.R. (2020) Assessment of 137Cs redistribution in floodplain sediments of the Upa River (Tula region) after the Chernobyl accident, Izvestia of the Russian Academy of Sciences. Series geographical, no. 1, pp. 67–79. DOI: 10.31857/S2587556620010082
12. State Water Cadastre. Multiyear data on the regime and resources of terrestrial surface waters. Vol. 1, no. 11: Irtysh Basin, L: Gidrometeoizdat, 1986.
13. State Water Cadastre. Iset River. URL:<https://textual.ru/gvr/index.php?card=195865> (accessed on 03.04.2025)
14. Davankov A. Yu. (2007) Assessment of the damage caused to the polluted territories by the accident of 1957, Nature Protection of the Southern Urals: regional ecological almanac, pp. 53–55.
15. Drozhko E. G., Mokrov Yu. G. (2008) Techenskiy cascade of reservoirs: problems of safety and regulation, Nature protection of the southern Urals: regional ecological almanac, pp. 44–51.
16. Yearbooks «Radiation Situation in Russia and Neighbouring Countries in 2003–2023». St. Petersburg: Hydrometeoizdat, 2004–2024. URL: <https://egasmro.ru/ru/data> (accessed on 03.04.2025).
17. Zabavnova A.A. (2021) Seasonal runoff of the rivers of the Russian Irtysh basin. Bachelor's thesis. Tomsk, URL: <https://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vital:14939>.
18. Zaikov B.D. (1946) Average runoff and its distribution in a year on the territory of the USSR, Proc. of NIU GUGMS. NIU GUGMS. Ser. IV, Vol. 24, pp. 67–95.
19. Conclusion of the Commission for Assessment of the Environmental Situation in the Area of the Production Association «Mayak», organised by the Decision of the Presidium of the USSR Academy of Sciences No. 1140-501, Radiobiology, 1991, Vol. 31, no. 1, pp. 436–452.
20. Izrael Yu.A., Kvasnikova E.V., Linnik V.G. (2012) Radioactive contamination of the territory of Russia. Changes in the natural environment of Russia in the XX century (2012), Moskva, Russia.
21. Izrael Yu.A., Nazarov I.M., Friedman S.D., Kvasnikova E.V. (1994) Methods and some results of aviation gamma survey of radioactive contamination of the territory of the European part of Russia // Radioactive fallout after nuclear explosions and accidents: collection of articles, SPb.: Gidrometeoizdat, 280 p.
22. Kazachenok N.N. (2017) Geoecology of technogenic radioactive isotopes. Mogilev: Belorus.-Ros. un. university.
23. Karavaeva, E.N., Molchanova I.V. (1979) Role of some categories of soil moisture in vertical movement of ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs in soil, Ecology, no. 1, pp. 48–52.
24. Kotova A.Yu., Sanzharova N.I. (2002) Behaviour of some radionuclides in different soils, Soil Science, no. 1, pp. 108–120.
25. Kulikov N.V., Molchanova I.V., Karavaeva E.N. (1990) Radioecology of soil and vegetation cover. Sverdlovsk, Russia.
26. Linnik V.G. (2018) Landscape differentiation of technogenic radionuclides, Moskva, Russia.
27. Linnik V.G. (2002) Landscape methods in radioecology, Scientific Aspects of Environmental Problems of Russia: Proceedings of the All-Russian Conference. M: Science, no. 1., pp. 364–369.
28. Linnik V.G. (2009) Radioecological analysis of river basins in areas of influence of nuclear fuel cycle enterprises, Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference «Ecology of river basins» (ERB-2009), pp. 60–65.
29. Linnik V.G. (2011) Technogenic radionuclides in floodplains The flow and middle current of the Yenisei River, *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5. Geografiya*, no. 4, pp. 24–30.
30. Makkaveev N.I. (1955) River bed and erosion in its basin, Moskva, Russia
31. Malikov I.N., Sukhorukov F.V., Strakhovenko V.D., Scherbov B.L. (2010) On the heterogeneity of the modern distribution of radiocaesium in the soils of Western Siberia, Scientific Journal, no. 10-05-00370, pp. 56–70.
32. Miroshnikov A.Yu. Regularities of distribution and accumulation of radiocaesium in bottom sediments of the Kara Sea. Candid. Dis. Moscow, 2012. 24 p.
33. Mokrov Yu.G. (2005) Reconstruction of radioactive runoff of the main radionuclides with the waters of the Techa River in the period 1949–1954, Bulletin of Siberian Medicine, Vol. 4, no. 2, pp. 110–116.
34. Mokrov Y.G. Reconstruction and forecast of radioactive contamination of the Techa River. Doct. Dis. Ozersk, 2005. 48 p.
35. Molchanova I.V., Karavaeva E.N. (2001) Ecological and geochemical aspects of radionuclide migration in soil and vegetation cover, Ekaterinburg, Russia.
36. Molchanova I.V., Karavaeva E.N., Mikhailovskaya L.N. (2006) Radioecological Investigations of the Soil and Vegetation Cover, Ekaterinburg, Russia.
37. Molchanova I.V., Kulikov N.V. (1972) Radioactive isotopes in the soil-plant system, Moskva, Russia.
38. Muslyumovo: results of 50-year observation / Edited by A.V. Akleyev and M.F. Kiselev. Chelyabinsk, 2001.
39. National atlas of Russia. Nature and ecology [Electronic resource] / Maps of FSUE «GOSGISCENTER». Moscow: Roskartografia, 2007.
40. Nikitin A. I. I. I., Kryshev I. I., Chumichev V. B., Kryshev A. I., Valetova N. K., Kabanov A. I., Katrich I. Yu. M., Mironenko A. N. (2008) Radioecological monitoring of the Ob-Irtysh river system, Proceedings of the international conference «Radioecology: results, current state and prospects», pp. 151–167.
41. SanPiN 2.6.1.2523-09. Radiation Safety Norms (NRB-99/2009): Sanitary and Epidemiological Rules and Regulations, Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated 07.07.2009 No. 47. Registered in the Ministry of Justice of the Russian Federation 14.08.2009 №14534.
42. Report on ecological safety of FSUE PO Mayak for 2021 / State Corporation. «Rosatom»; FGUP «PA Mayak». Ozersk: RIC VRB; FGUP PO Mayak, 2022. 65 p.
43. Consequences of man-made radiation exposure and problems of rehabilitation in the Ural region / Edited by S.K. Shoigu. Moscow: Komtehprint, 2002. 287 p.

Экология и природопользование
Шамшурина Е.Н., Куракова А.А., Коноплев А.В., Голосов В.Н.

44. Radioecological situation in the regions where the enterprises of the State Atomic Energy Corporation 'Rosatom' are located / Edited by I. I. Linge and I. I. Kryshev. I. Linge and I. I. Kryshev. M., 2021. 555 p.
45. Regional electronic hydrographic data network for the Arctic region. URL: <https://www.r-arcticnet.sr.unh.edu/v4.0/index.html> (accessed on 03.04.2025).
46. Resonance: South Ural Nuclear Power Plant: To Be or Not to Be? Chelyabinsk: South Ural Book Publishing House, 1991. 56 p.
47. Sapozhnikov Yu.A., Aliev V.A., Kalmykov S.N. (2006) Radioactivity of the Environment. Theory and Practice, Moskva, Russia.
48. Silantiev A.N., Shkuratova I.G. (1983) Detection of industrial pollution of soil and atmospheric deposition against the background of global pollution, Leningrad, Russia.
49. Tarasov O.V. Radioecology of terrestrial vertebrates of the head part of the East-Ural radioactive trace. Candid. Dis. Ozersk, 2000. 151 p.
50. Trapeznikov A.V., Pozolotina V.N., Yushkov P.I., Trapeznikova V.N., Molchanova I.V., Karavaeva E.N., Chebotaina M.Ya, Chen K. (1999) «Investigation of radioecological situation in the Techa and Iset rivers contaminated by discharges of PA «Mayak», Problems of radioecology and frontier disciplines: Collection of scientific papers, Ural State Technical University, pp. 20–66.
51. Trapeznikov A.V., Trapeznikova V.N., Korzhavin A.V., Nikolkin V.N. (2007) Radionuclide migration in freshwater and terrestrial ecosystems, Vol. 2, Ekaterinburg, Russia.
52. Trapeznikov A.V., Trapeznikova V.N., Korzhavin A.V., Nikolkin V.N. (2014) Radioecological monitoring of freshwater ecosystems, Vol. I, Ekaterinburg, Russia.
53. Trapeznikov A.V., Trapeznikova V.N. (2012) Freshwater Radioecology. Ekaterinburg, Russia.
54. Firsova V.P., Molchanova I.V., Meshcheryakov P.V. et al. (1996) Soil and ecological conditions for the accumulation and redistribution of radionuclides in the VURS zone, Ekaterinburg, Russia.
55. Khokhryakov V.V., Drozhko E.G., Romanov G.N., Mokrov Y.G., Kyamkin A.M., Volobuev P.V., Vorobieva M.I., Kostyuchenko V.A., Akleyev A.V., Chelyukanov V.V. (2002) Characteristics of technogenic radiation impact on the territory and population, Consequences of technogenic radiation impact and problems of rehabilitation of the Ural region, pp. 39–44.
56. Chernov A.V. (2009) Geography and Geocological Condition of Riverbeds and Floodplains in Northern Eurasia, Moskva, Russia.
57. Aarkrog A., Trapeznikov A., Molchanova I., Yushkov P., Pozolotina V., Polikarpov G., Dahlgaard H., Nielsen S. (2000) Environmental modelling of radioactive contamination of floodplains and sorlakes along the Techa and Iset rivers // Journal of Environmental Radioactivity, Vol.49, pp. 243–257.
58. Aarkrog A., Tsaturov Y., Polikarpov G.G. (1994) Sources to environmental radioactive contamination in the former USSR, Radiation protection. vol.71. European Comission. Directorate – General Environment, Civil Protection and Nuclear Safety, 62 p.
59. Chesnokov A.V., Govorun A.P., Linnik V.G., Shcherbak S.B. 137Cs contamination of the Techa river flood plain near the village of Muslimovo // Journal of Environmental Radioactivity. 2000. Vol. 50. P. 179–191. DOI: 10.1016/S0265-931X(99)00110-1
60. Hirose K. (2012) 2011 Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident: summary of regional radioactive deposition monitoring results // Journal of Environmental Radioactivity, Vol. 3, P. 111:13–7. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2011.09.003
61. Konoplev A.V., Bulgakov A.A., Popov V.E., Hilton J., Comans R.N. (1996) Long-Term Investigation of ¹³⁷Cs Fixation by Soils, Radiation Protection Dosimetry, Vol. 64, p. 15–18.
62. Playford K. Lewis G.N.J. and Carpenter R.C. (1990) Radioactive fallout in air and rain: results on the end of 1989, Report AEA-EE-0227, DOE/HMIP/PR/91/042, Harwell Laboratories, UK, 21 p.
63. 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. Osteras, 1997, 134 p.

Статья поступила в редакцию: 21.11.24, одобрена после рецензирования: 12.08.25, принятая к опубликованию: 12.09.25.

The article was submitted: 21 November 2024; approved after review: 12 August 2025; accepted for publication: 12 September 2025.

Информация об авторах

Шамшурина Евгения Николаевна

кандидат биологических наук, научный сотрудник,
 лаборатории геохимии природных вод,
 географический факультет,
 Московский государственный университет
 им. М.В. Ломоносова;
 119899, Россия, Москва, Ленинские горы, 1

Information about the authors

Evgenia N. Shamshurina

Candidate of Biological Sciences, Scientific
 Researcher, Laboratory of Geochemistry of Natural
 Waters, Faculty of Geography,
 Lomonosov Moscow State University;
 1, Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119899

e-mail: shamshyr@mail.ru

Экология и природопользование
Шамшурина Е.Н., Куракова А.А., Коноплев А.В., Голосов В.Н.

Куракова Анна Александровна

кандидат географических наук, научный сотрудник,
лаборатории геохимии природных вод,
географический факультет,
Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова;
119899, Россия, Москва, Ленинские горы, 1

e-mail: a.a.kurakova@mail.ru

Коноплев Алексей Владимирович

доктор биологических наук, заведующий
лабораторией геохимии природных вод,
географический факультет,
Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова;
119899, Россия, Москва, Ленинские горы, 1

e-mail: alexeikonoplev@gmail.com

Валентин Николаевич Голосов

доктор географических наук, ведущий научный
сотрудник лаборатории геохимии природных вод,
географический факультет,
Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова;
119899, Россия, Москва, Ленинские горы, 1

e-mail: golossov@gmail.com

Anna A. Kurakova

Candidate of Geographical Sciences, Scientific
Researcher, Laboratory of Geochemistry
of Natural Waters, Faculty of Geography,
Lomonosov Moscow State University;
1, Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119899

Alexey V. Konoplev

Doctor of Biological Sciences, Head of Laboratory,
Laboratory of Geochemistry of Natural Waters,
Faculty of Geography,
Lomonosov Moscow State University;
1, Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119899

Valentin N. Golosov

Doctor of Geography, Leading Researcher, Laboratory
of Geochemistry of Natural Waters, Faculty of
Geography,
Lomonosov Moscow State University;
1, Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119899

Вклад авторов

Шамшурина Е.Н. – анализ данных, подготовка рукописи статьи.

Куракова А.А. – геоинформационное картографирование, подготовка рукописи статьи и рисунков.

Коноплев А.В. – подготовка рукописи статьи.

Голосов В.Н. – подготовка рукописи статьи.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

Evgenia N. Shamshurina – data analysis, preparation of the manuscript.

Anna A. Kurakova – GIS mapping, preparation of the manuscript.

Alexey V. Konoplev – preparation of the manuscript.

Valentin N. Golosov – preparation of the manuscript.

The authors declare no conflict of interest.