

УДК 504.3.054

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАПАСА ^{137}Cs В ПОЙМЕ р. ТЕЧИ В РАЙОНЕ с. МУСЛЮМОВО

Говорун А.П., Чесноков А.В., Щербак С.Б. (НПТ РЭКОМ)

Из-за несовершенства технологии производства на ПО «Маяк» в 1949—1952 гг. в водную систему р. Течи были сброшены жидкие радиоактивные отходы средней и высокой удельной активности [1]. В 1951—1964 гг. на территории этого предприятия были построены искусственные водохранилища и прекращен сброс радиоактивных отходов в реку. В настоящее время прямое поступление радионуклидов существенно ограничено каскадом плотин и обводных каналов.

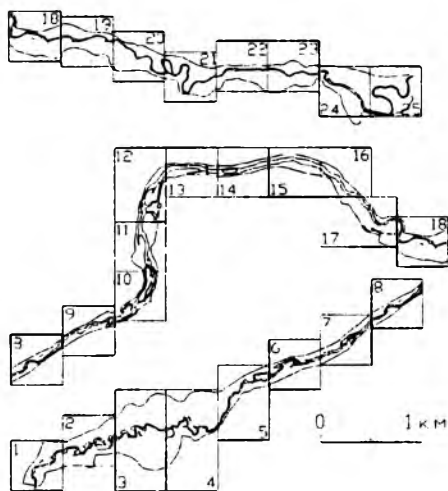
Село Муслюмово расположено на обоих берегах р. Течи в 37 км от 11-й плотины, отделяющей расположенные на территории ПО «Маяк» загрязненные водоемы от открытой гидрологической системы. В пределах границ села часть примыкающей к берегам реки территории ограждена колючей проволокой и юридически выведена из хозяйственной деятельности. Однако, несмотря на административные запреты, пойменную территорию по-прежнему используют для выпаса скота, заготовки кормов, рыбной ловли и т.д., что является на данный момент основным дозобразующим фактором для населения села.

В рамках уральской программы МинЧС и в соответствии с заключением комиссии [1] в 1995—1996 гг. проведены радиационная съемка и крупномасштабное картирование распределения поверхностной активности (запаса) ^{137}Cs в почве поймы р. Течи в районе с. Муслюмово. Эта работа является продолжением начатого осенью 1994 г. крупномасштабного картирования загрязнения поймы р. Течи в пределах населенных пунктов [2] с использованием радиометра РКГ-09Н (КОРАД), который позволяет измерять запас ^{137}Cs в почве с учетом его заглубления [3—5].

Известны данные о радиоактивном загрязнении почвы в пойме некоторых мест, расположенных вдоль реки [6—11]. Однако до настоящего времени не созданы карты, позволяющие анализировать распределение ^{137}Cs в почве для протяженных участков реки. В особом ряду стоят данные аэрогаммасъемки, представленные в виде карты масштабом 1:500 000 [9]. На этой карте даны уровни загрязнения ^{137}Cs , усредненные по большой площади, по-видимому, более 1 км². Из-за большого масштаба усреднения сравнивать результаты с данными полевых измерений крайне затруднительно. Так, согласно карте [9] в наиболее мощных пятнах загрязнения в районе с. Муслюмово поверхностная активность ^{137}Cs не превышает 40 Ки/км², что более чем в 10 раз расходится с данными прямых полевых измерений. Проводить количественный анализ распределения загрязнения поперек поймы реки для карт такого масштаба не представляется возможным.

В 1994 г. было выполнено картирование распределения ^{137}Cs в пойме р. Течи в районе пос. Бродокалмак [2]. По результатам измерений, проведенных на территории протяженностью вдоль русла реки около 3,5 км, площадью ~ 0,5 км², запас ^{137}Cs составил 17,8 Ки (0,66 ТБк). Для верификации данные полевой радиометрии, выполненной с применением радиометра РКГ-09Н, сопоставили с результатами пробоотбора на специально выбранных калибровочных площадках [2]. Эти площадки в последующие годы использовали для совершенствования методики измерения ^{137}Cs , разработки и тестирования полевого прибора для определения содержания ^{90}Sr в почве [12].

Методика обследования территории поймы. Полевые измерения в пойме р. Течи в районе с. Муслюмово проводили в два этапа. В июне 1995 г. обследовали территорию поймы в районе станции и с. Муслюмово протяженностью более 7 км вдоль русла



Р и с. 1. Карта-схема обследованной территории поймы р. Течи в районе с. Муслумово

Одной из основных задач съемки являлось уточнение границ участков поймы, радиоактивное загрязнение которых превышало 1 Ки/км^2 по ^{137}Cs . Для измерения распределения запаса ^{137}Cs в пойме р. Течи были созданы электронные планы-карты местности. В качестве топографической основы использовали топографические карты масштабом 1:5000 и фотопланшеты масштабом 1:14 000 аэрофотосъемки, выполненной в 1994 г.

По возможности съемку радиоактивного загрязнения территории осуществляли вдоль профилей, начинающихся у кромки воды и перпендикулярных руслу реки. Расстояние между профилями 20—50 м. Протяженность профиля определялась шириной поймы в данном месте. Измерения ограничивали запасом ^{137}Cs , не превышающим 1 Ки/км^2 (по показаниям прибора КОРАД). Часто профили заканчивались у очередного террасного уступа — резкого повышения поймы на 1—5 м. Граница измерений находится в пределах от нескольких до сотен метров от существующего в момент съемки берега. Граница обследованной территории, а также берега реки и небольшие пойменные водосмы показаны на рис. 1. Расстояние между точками измерений в профилях определяли исходя из ландшафтных особенностей местности, оно обычно составляло 10—20 м.

Создание карт. Обработку результатов полевых измерений и создание карт радиоактивного загрязнения проводили на базе методики [2, 5], ориентированной на персональные компьютеры IBM PC. Сначала создавали электронную топокарту и фотоплан обследуемой территории в виде растровых баз данных. В качестве базового формата при этом использовали стандартный BMP-формат операционной системы MS WINDOWS. Картографической основой служили топографические карты и фотоснимки. Фотоплан и топокарта дополняли одна другую. При ориентации на местности и нанесении точек на электронную карту основным был фотоплан, который содержал детали, позволяющие более точно осуществить привязку к местности.

На электронную карту наносили профили берегов реки, пойменных водоемов, границы обследованного участка поймы и точки проведения полевых измерений. Далее рассматриваемый участок поймы разбивали на прямоугольные секции. Одна из сторон каждой прямоугольной секции равна 0,5 км и лежит на стандартной 250-метровой сетке. Другая сторона близка к 0,5 км (многие равны 0,5 км и также лежат на стандартной сетке). Эти прямоугольные секции не пересекаются и полностью покрывают рассматриваемый участок (см. рис. 1).

Результаты, полученные для каждой прямоугольной секции, далее обрабатывали отдельно. Сначала для обследованной территории проводили триангуляцию, которая

реки (секции № 6—17 на рис. 1). В августе 1996 г. обследованный участок был расширен вверх (секции № 1—5) и вниз по течению реки (секции № 18—25). Площадь обследованной территории $2,5 \text{ км}^2$, протяженность вдоль русла реки 16,6 км, запас ^{137}Cs 177,8 Ки. На основе около 5000 измерений создан электронный банк данных, характеризующий загрязнение поймы, и построены карты запаса ^{137}Cs и глубины его проникновения в почву.

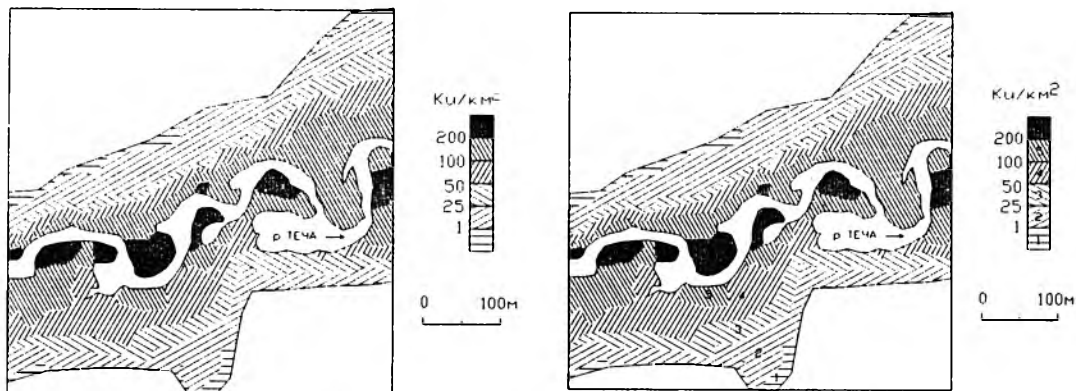
В ходе измерений использовали приборы РКГ-09Н с размером сцинтилляционного кристалла NaI(Tl) $50 \times 50 \text{ мм}$ [3, 4]. Приборы сертифицированы ВНИИФТРИ Госстандарта РФ с применением аттестованных поверхностных плоских источников ^{137}Cs .

заключается в разбиении области на непересекающиеся треугольники, обладающие свойством Делоне: в описанную около любого треугольника окружность не попадают остальные точки. При триангуляции учитывали точки измерений, точки излома береговой линии, пойменных водоемов и границы обследованной территории. Переход от точечного представления характеристик загрязнения к непрерывному в каждом треугольнике проходил простейшим образом: по трем значениям в вершинах треугольника однозначным образом строилось линейное (по пространственным переменным) распределение. Характеристики загрязнения в точках излома береговой линии и пойменных водоемов получали сносом по триангуляционной сетке из ближайших точек, запас принимался нулевым на границе обследованной территории.

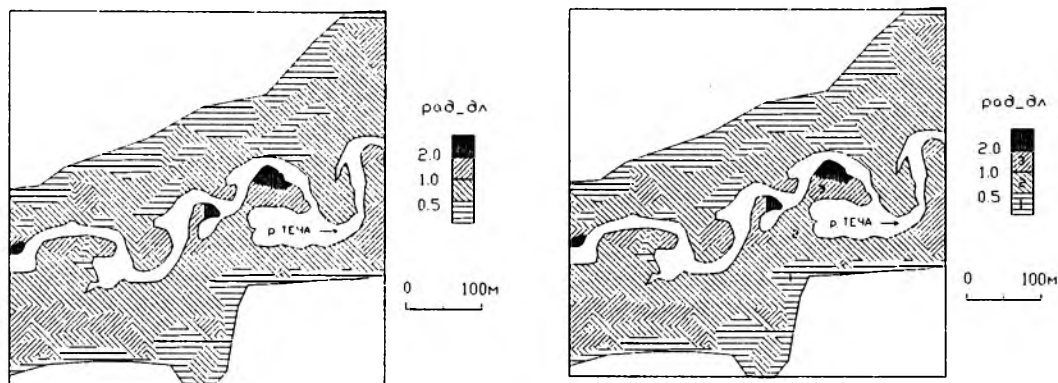
Таким образом, во всей рассматриваемой области получались непрерывные функции распределения характеристик загрязнения. Изолинии этих функций показаны на картах запаса и заглупления (рис. 2, 3). На картах глубины проникновения ^{137}Cs в почву в качестве единицы длины использовалась радиационная длина (рад. дл.) — длина пробега фотона энергией 662 кэВ. Для почвы 1 рад. дл. = $1/(\mu\rho)$, где μ — коэффициент массового поглощения фотонного излучения в почве; ρ — плотность почвы. Полагая $\mu = 0,0775 \text{ см}^2/\text{г}$, $\rho = 1,3 \text{ г/см}^3$, получаем, что 1 рад. дл. = 10 см.

Результаты измерений. Ширина загрязненной территории определяется рельефом местности, точнее, уровнем весеннего разлива реки. Исключения составляют дороги и пешеходные тропы, проходящие через броды на реке. На них зарегистрирован запас ^{137}Cs более 1 Ки/км² даже на 100 м далее от берега реки, чем на окружающей территории.

В некоторых точках измерения выполнены в реке на мелководье под слоем воды. Методика допускает наличие слоя воды до 20 см. Специально выбирали точки с ка-



Р и с. 2. Карта запаса ^{137}Cs в почве поймы р. Течи (секция № 2) в районе с. Муслимово



Р и с. 3. Карта заглупления ^{137}Cs в почве поймы р. Течи (секция № 2) в районе с. Муслимово

менистым, песчаным и илистым дном. Полученный запас ^{137}Cs оказался в 10 и более раз меньше, чем на берегу. Загрязнение глубинных, плесовых частей реки не исследовали.

Несколько подробных измерений с небольшим пространственным шагом (до 1 м) было выполнено на участках поймы с простейшим береговым профилем, слабо изменяющимся вдоль течения реки, монотонно повышающимся в поперечном направлении и без заметной задерживающей течение растительности (кусты, деревья и т.п.). Характерное распределение запаса вдоль профиля, перпендикулярного течению реки, в зависимости от расстояния до береговой линии показано на рис. 4.

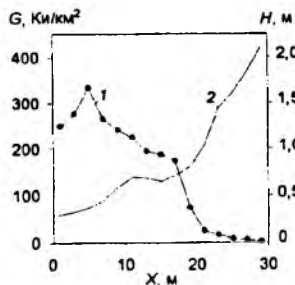


Рис. 4. Распределение запаса ^{137}Cs G (1) и высота берега H (2) в зависимости от расстояния до воды X (секция № 15, правый берег)

В распределении запаса ^{137}Cs для пологих берегов в районе с. Муслумова традиционным является загрязнение более 200 Ки/км² при высоте берега над уровнем воды в реке менее 1 м. Более того, береговые отложения, намытые в последние годы, имеют загрязнение, близкое к 200 Ки/км². Примерно на той же высоте над уровнем воды в реке находится большинство локальных максимумов запаса на соседних участках реки со сложными береговыми линиями. Заметную роль играют и другие факторы: извилистый характер русла реки (абсолютный максимум запаса часто достигается за крутым поворотом реки), наличие задерживающей течение растительности (кусты, густая трава) и пересыхающие речные протоки.

На участках поймы, по рельефу сходных с обследованными ранее, после нескольких контрольных измерений в характерных точках можно было предсказать с удовлетворительной погрешностью запас ^{137}Cs в произвольной точке данного элемента рельефа местности путем интерполяции или даже экстраполяции данных контрольных измерений. В сущности можно говорить, что измеряемый запас ^{137}Cs является индикатором рельефа местности, а представленная на рис. 4 зависимость универсальной. Отметим здесь два обстоятельства. Во-первых, в цели настоящей работы не входило выявление зависимости между рельефом местности и загрязнением в пойме. Это достаточно сложная задача будущих исследований. Во-вторых, не менее трудным выглядит строгое математическое описание рельефа местности. Точность описания поверхности рельефа (высоты над уровнем воды в реке) должна соответствовать характерному перепаду воды в реке (~ 50 см на 1 км реки). Даже без учета естественных неровностей (трава, кусты, деревья и т.п., влияние которых может быть, как показывают измерения, значительным) построение поверхности рельефа с такой точностью представляется возможным лишь для крайне ограниченных участков реки.

В границах обследованных участков максимальная ширина поймы по обоим берегам реки до 700 м отмечена в западной части территории (секция № 3). Наиболее протяженные участки длиной около 1 км с минимальной шириной поймы до 70 м находятся в районе ст. Муслумово (секции № 7, 8, 9) и с. Муслумово (№ 14). На общей обследованной площади 2,5 км² по данным измерений аккумулировано 177,8 Ки ^{137}Cs .

Глубина проникновения ^{137}Cs в почву в большинстве точек превышают 1,5 рад. дл. (18 г/см²). Таким образом, загрязнение достаточно хорошо зафиксировано в почве, и в ближайшие годы не следует ожидать значительного изменения ситуации благодаря естественным процессам.

Интегральные характеристики загрязнения для отдельных секций реки (см. рис. 1) представлены в таблице. На обследованном участке четко выделяются два крупномасштабных пятна с максимальным суммарным запасом ^{137}Cs . Одно из них находится

выше (секции № 2—4), другое ниже (секции № 19—25) по течению от ст. и с. Муслюмово. В этих же местах зарегистрированы и локальные максимумы запаса выше 800 Ки/к м². Полученные данные качественно согласуются с данными аэрогаммасъемки (поверхностная активность здесь менее 40 Ки/км² согласно [9]), однако количественное сравнение результатов затруднено неопределенностью площади усреднения аэрогаммасыъемки.

Характеристики загрязнения ¹³⁷Cs поймы р. Течи в районе с. Муслюмово

Номер секции	Длина участка реки, м	Запас, Ки	Максимальная плотность, Ки/км ²	Загрязнение, Ки/км ²					
				1—25	25—50	50—100	100—200	200—400	> 400
				Площадь поймы, м ²					
1	480	5,4	693	30755	10271	17401	17212	3571	553
2	800	11,1	756	38063	21575	28733	36796	9020	563
3	710	27,0	833	82970	55030	66921	51184	36147	3746
4	750	13,4	777	132009	31202	24510	13412	15322	5288
5	810	5,0	457	44396	18140	16237	10647	5040	50
6	600	2,3	523	19411	5739	10108	4948	2072	10
7	630	2,6	688	15183	8000	10489	8023	1114	38
8	660	2,4	394	13826	7728	13602	5333	968	0
9	610	2,7	350	12801	8705	12453	7070	1407	0
10	650	4,7	458	14707	5911	6882	14024	6721	40
11	550	5,0	381	15067	11476	25131	13744	2667	0
12	600	6,9	523	10492	2878	4222	15961	14266	242
13	530	3,3	626	12720	2889	2582	5613	6343	817
14	540	2,2	481	10894	3830	3830	5098	2912	279
15	540	3,1	530	14445	4256	6019	9302	3680	136
16	480	2,0	648	16433	5597	3976	4682	2156	192
17	810	4,8	667	54357	13185	18329	12530	2386	185
18	550	4,7	524	58282	9355	8521	11374	4333	815
19	540	8,7	578	26257	16374	14838	16294	14181	1136
20	850	11,9	819	21615	19800	22319	32653	13953	1773
21	1060	14,1	581	21176	11278	25621	45443	15475	1943
22	530	7,1	521	19897	19373	21472	12569	5530	2921
23	540	9,3	750	18387	25902	24945	21774	10043	973
24	740	7,7	546	73338	25469	28916	13820	6823	334
25	1070	10,4	694	27496	22263	29924	26482	11026	1062
Всего	16630	177,8	833	804977	366226	447981	415988	197156	23096

Средние характеристики загрязнения для отдельной секции рски меняются в широких пределах: максимальный запас может отличаться более чем в 2 раза, площадь поймы, загрязненной выше 1 Ки/км², в 6—8 раз, запас, усредненный по этой площади, меняется от 35 до 115 Ки/км². При этом длина реки в пределах секций меняется чуть более чем в 2 раза. Все это требует построения детальных карт загрязнения, а усредненные по большим площадям при большом числе точек измерения дифференциальные характеристики загрязнения существенно более точно отражают уровни загрязнения, чем интегральные данные аэрогаммасыъемки, площадь сбора фотонов для которой недостаточно известна. Аэрогаммасыъемка важна для установления интегральных харак-

теристик загрязнения, тем не менее на основе ее данных необходимо детальное обследование методами полевой радиометрии для уточнения, верификации и создания баз детальных данных об уровнях загрязнения пойменных территорий.

Полученные данные о содержании ^{137}Cs в пойме р. Течи являются основой для определения коэффициентов перехода ^{137}Cs из почвы в растительность и далее в пищевые продукты, для уточнения дозы внутреннего облучения населения, проживающего в с. Муслумово. В настоящее время подготавливается единая база данных измерений на р. Тече. Планируется, что она будет позволять пользователю не только просматривать данные, но и моделировать последствия простейших типов дезактивационных работ (удаление слоя почвы, засыпка чистым слоем, перекопка почвы на заданную глубину).

Закключение. На основе измерений поверхностной активности (запаса) ^{137}Cs в почве построены крупномасштабные электронные карты распределения содержания ^{137}Cs в пойме 16-километрового участка р. Течи в районе с. Муслумово. Неравномерность загрязнения ^{137}Cs пойменных массивов обусловлена прежде всего рельефом поймы. Максимальная плотность загрязнения до 800 Ки/км^2 , как правило, наблюдалась на характерных высотах, в местах резкого снижения скорости течения паводковых вод и при наличии кустарников и густой травяной растительности. Дно русла реки на перекатах загрязнено в 10–100 раз меньше, чем почва на берегу.

По результатам измерений создан электронный банк данных. Разработанное программное обеспечение позволяет моделировать дезактивационные мероприятия и оценивать их объем, стоимость и эффективность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заключение Комиссии по оценке экологической ситуации в районе деятельности производственного объединения «Маяк» Минатомэнергопрома СССР. — Радиобиология, 1991, т. 31, вып. 3, с. 436–452.
2. Иванчикова М.В., Исаева Л.Н., Яценев В.А. и др. Распределение уровней загрязнения ^{137}Cs поймы реки Течи в поселке Бродокалмак. — Проблемы экологии Южного Урала, 1996, № 1, с. 7–18.
3. Говорун А.П., Ликсонов В.И., Романко В.П. и др. Спектрально-чувствительный переносной коллиматорный гамма-радиометр КОРАД. — ПТЭ, 1994, № 5, с. 207–208.
4. Говорун А.П., Ликсонов В.И., Потапов В.Н. и др. Расчетно-экспериментальное обоснование метода определения плотности загрязнения и заглубления в почве ^{137}Cs . — Атомная энергия, 1995, т. 78, вып. 3, с. 199–204.
5. Chesnokov A.V., Fedin V.I., Govorun A.P. et al. Collimated detector technique for measuring a ^{137}Cs deposit in soil under a clean protected layer. — Applied Rad. Isotop., 1997, v. 48, № 9, p. 1265–1272.
6. Трапезников А.В., Позолотина В.Н., Чеботина М.Я. и др. Радиационное загрязнение реки Течи на Урале. — Экология, 1993, № 5, с. 72–77.
7. Берзина И.Г., Четкин В.А., Хотулева М.В. и др. Радиоактивное загрязнение биологических объектов и природных сред в районе пос. Муслумово (Челябинская обл.). — Радиационная биология. Радиоэкология, 1993, т. 33, вып. 2(5), с. 748–759.
8. Молчанова И.В., Каравасва Е.Н., Позолотина В.Н. и др. Закономерности поведения радионуклидов в пойменных ландшафтах реки Течи на Урале. — Экология, 1994, № 3, с. 43–49.
9. Израэль Ю.А., Назаров И.М., Фридман Ш.Д., Квасникова Е.В. Радиоактивное загрязнение цезием-137 территории европейской части СНГ в 1992 г. в результате аварии на Чернобыльской атомной электростанции. — В сб.: Методика и некоторые результаты авиационной гаммасъемки радиоактивного загрязнения территории европейской части России. Санкт-Петербург: Гидрометеоздат, 1994, с. 16–51.
10. Yachmenev V.A., Isageva L.W. Environmental monitoring in the vicinity of the Mayak atomic facility. — Health Physics, 1996, v. 71, № 1, p. 61–70.
11. Мартынов В.В., Спири Д.А., Базылев В.В. и др. Радиологические аспекты поведения долгоживущих радионуклидов в пойменных ландшафтах верхнего течения реки Течи. — Экология, 1997, № 5, с. 361–368.
12. Говорун А.П., Ликсонов В.И., Потапов В.Н. и др. Способ определения удельной активности ^{90}Sr в почве методом полевой спектрометрии. — Вопросы радиационной безопасности, 1997, № 2, с. 42–50 (ПО «Маяк»).