

УДК 551.435:631.42:546.79

ОЦЕНКА ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ^{137}Cs В ПОЙМЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ РЕКИ УПА (ТУЛЬСКАЯ ОБЛАСТЬ) ПОСЛЕ АВАРИИ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

© 2020 г. В. Н. Голосов^{a, b, c, *}, Л. В. Куксина^a, М. М. Иванов^{a, b}, Н. Л. Фролова^a,
Н. Н. Иванова^a, В. Р. Беляев^a

^aМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия

^bИнститут географии РАН, Москва, Россия

^cКазанский Федеральный университет, Казань, Россия

*e-mail: gollossov@gmail.com

Поступила в редакцию 08.08.2018 г.

После доработки 15.05.2019 г.

Принята к публикации 03.10.2019 г.

На основе совместного анализа эпюр вертикального распределения радионуклида ^{137}Cs чернобыльского происхождения в отложениях низкой поймы и гидрологического режима р. Упы на участке от впадения р. Плава до устья выявлены изменения содержания ^{137}Cs , как по длине долины, так и в течение всего послечернобыльского периода (начиная с 1986 г.). Установлено, что за период 1986–2014 гг. происходило сокращение доли наносов и переносимого совместно с ними ^{137}Cs бассейнового происхождения в стоке реки, особенно заметное после 2006 г. Сокращение содержания ^{137}Cs в пойменных отложениях по длине р. Упы на участке от впадения р. Плава, дренирующей наиболее радиоактивно загрязненную часть бассейна р. Упы, и до устья происходит синхронно нарастанию водности реки по мере увеличения площади водосбора. Современные запасы ^{137}Cs в отложениях низкой поймы р. Упы превышают начальные уровни ее загрязнения после выпадения ^{137}Cs чернобыльского происхождения. Рост запасов обусловлен аккумуляцией загрязненных наносов со скоростью 1.5–2.7 см/г при прохождении весеннего половодья и высоких дождевых паводков.

Ключевые слова: радиоактивное загрязнение, удельная активность, затопление, пойма, гидрологический режим, аккумуляция, плотность загрязнения, водность, Чернобыльская авария

DOI: 10.31857/S2587556620010082

ВВЕДЕНИЕ

После аварии на Чернобыльской АЭС основным компонентом выпадений дальней зоны загрязнения является долгоживущий радионуклид ^{137}Cs искусственного происхождения, появившийся в окружающей среде в результате испытаний ядерного оружия в открытой атмосфере с начала 1950-х годов [10, 11]. Поступая на поверхность почвы, ^{137}Cs прочно сорбируется почвенными частицами, в основном тонкими фракциями, и вместе с ними включается в процессы массопереноса, происходящие в речном бассейне [30, 31].

Основными агентами перемещения почвенно-грунтового материала выступают склоновый и речной стоки [8, 33, 34]. На склонах основным механизмом латеральной миграции почвенных частиц, загрязненных ^{137}Cs , является плоскостной, ручейковый смыв и линейные размывы; в нижележащих звеньях флювиальной сети пере-

нос материала осуществляется временными и постоянными водотоками [33, 36]. Согласно имеющимся количественным оценкам, не более 5–15% от общего объема смытого с поверхности водосбора материала попадает в постоянные водотоки [5, 26]. В результате происходит трансформация начального поля радиоактивного загрязнения за счет выноса части запасов ^{137}Cs с одних элементов рельефа и их накопления в других, в том числе в пределах подножий склонов, в днищах балочной сети и на поймах рек [21].

Использование ^{137}Cs для оценки темпов аккумуляции на поймах начато Д.Е. Уоллингом в конце 1980-х годов [37]. В России этот радионуклид и его поведение в ландшафте изучались не только в качестве маркера перемещения материала, но и в качестве одного из основных компонентов радиоактивного загрязнения территорий в результате крупных техногенных аварий. Так, особенности миграции радионуклидов в пределах речных пойм исследовались в районах радиоактивного загряз-

нения в бассейнах рр. Теча, Енисей, Ипуть и др. [12, 14, 16]. Оценка перераспределения ^{137}Cs экзогенными процессами проводилась и на участках долины р. Плава, бассейн которой характеризуется высокими уровнями радиоактивного загрязнения после Чернобыльской аварии [15].

Таким образом, для территорий с высокими уровнями загрязнения процессы перераспределения изотопа ^{137}Cs в пределах речных бассейнов достаточно хорошо изучены [19, 28, 34]. Выявлено, что основными участками накопления ^{137}Cs на локальном уровне являются подножия распахиваемых склонов, днища сухих долин, где происходит переотложение значительной части наносов, и, соответственно, ^{137}Cs , снесенного с обрабатываемых склонов [25, 34, 36], а также речные поймы, формирование которых обусловлено накоплением пойменного ила, формирующегося за счет поступления продуктов эрозии с территории бассейна, а также размыва русел рек [8, 33]. Вопросам распространения радиоактивного загрязнения за пределы зон с высокими уровнями начальных выпадений достаточно большое внимание уделялось только в первые годы после аварии, когда был организован мониторинг содержания ^{137}Cs и других радионуклидов на ряде рек (Днепр, Припять, Плава и др.), благодаря которому отслеживались изменения концентрации ^{137}Cs во взвешенных наносах [4, 9, 38]. По мере снижения концентраций ^{137}Cs в стоке рек к 1990–1991 гг. мониторинг был прекращен. В последние годы, т.е. на рубеже полураспада ^{137}Cs чернобыльского происхождения (30.2 г.), исследований миграции ^{137}Cs по долинам рек, расположенным вне зон сильного загрязнения, не проводилось.

Целями данной работы являются оценка особенностей распространения радиоактивного загрязнения по долине р. Упа ниже по течению от устья ее левобережного притока р. Плава, дренирующей наиболее загрязненную часть Плавского цезиевого пятна, и анализ динамики загрязнения пойменных отложений нижнего течения р. Упа за период 1986–2014 гг.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Бассейн р. Упа (площадь водосбора 9 510 км²), расположенный в северной части Среднерусской возвышенности в пределах Тульской области, был достаточно сильно загрязнен после аварии на Чернобыльской АЭС в апреле 1986 г. (рис. 1) [1]. Южная часть бассейна – территория со значительной долей пахотных земель (>50%) и достаточно интенсивной эрозией почв на пашне, темпы которой составляют 5–10 т/га в год [17]. Северная часть бассейна располагается в пределах более залесенных территорий (Тульские засеки), а также собственно в г. Тула с пригородами (севе-

ро-восточная часть бассейна). Среднегодовое количество осадков в регионе составляет около 600 мм/год (по данным Росгидрометцентра по г. Тула), из которых 76% приходится на дождевые осадки.

Первоначальная пространственная структура чернобыльских выпадений (конфигурация ареалов с различной плотностью загрязнения) была обусловлена розой ветров и интенсивностью дождей в период радиационных выбросов. В результате бассейн р. Упа, дренирующей центральную и южную часть Тульской области, оказался в зоне крайне неоднородного радиоактивного загрязнения, варьирующего от фонового до интенсивного (0.1–15 Ки/км²) [1].

Южная часть бассейна р. Упа (см. рис. 1) является одним из наиболее сильно радиоактивно загрязненных участков на большом удалении от Чернобыля на территории России. Содержание радионуклидов, накопившихся в пойменных отложениях после чернобыльских выпадений, отражает изменения концентрации ^{137}Cs в переносимых рекой взвешенных наносах как во времени, так и по длине долины р. Упа. Следует отметить, что сток наносов, формирующийся в верхней, достаточно сильно загрязненной части бассейна р. Упа, почти полностью перехватывается Шекинским водохранилищем. Основной объем ^{137}Cs , поступающего в р. Упа ниже по течению от Шекинского водохранилища, связан со стоком наносов ее южных левобережных притоков, наиболее крупным из которых является р. Плава [1, 9].

Характерной особенностью строения днища долины р. Упа на участке ниже впадения в нее р. Плава и до устья является наличие фрагментарных участков поймы низкого и среднего уровня, ширина которых не превышает 10 м. Основную часть днища долины занимают собственно русло реки и высокая пойма, имеющая ширину, достигающую до нескольких сот метров по обоим берегам реки. После разрушения существовавших до начала 1930-х гг. плотин водяных мельниц высокая пойма крайне редко затопливалась. Таким образом, в связи с малой площадью регулярно затопляемых уровней поймы объем аккумуляции на ней сравнительно невелик по отношению к общему объему наносов, транспортируемых рекой за каждый паводок. Изменения концентрации ^{137}Cs по глубине в аккумулятивной толще, накопившейся после 1986 г., отражают изменения во времени концентраций ^{137}Cs во взвешенных наносах при прохождении расхождений воды, достаточных для затопления низкой или средней поймы.

Устье р. Плава можно рассматривать в качестве точечного источника радиоактивного загрязнения долины р. Упа. Благодаря наличию действующего гидропоста на р. Упа, расположенного непосредственно ниже впадения р. Плава,

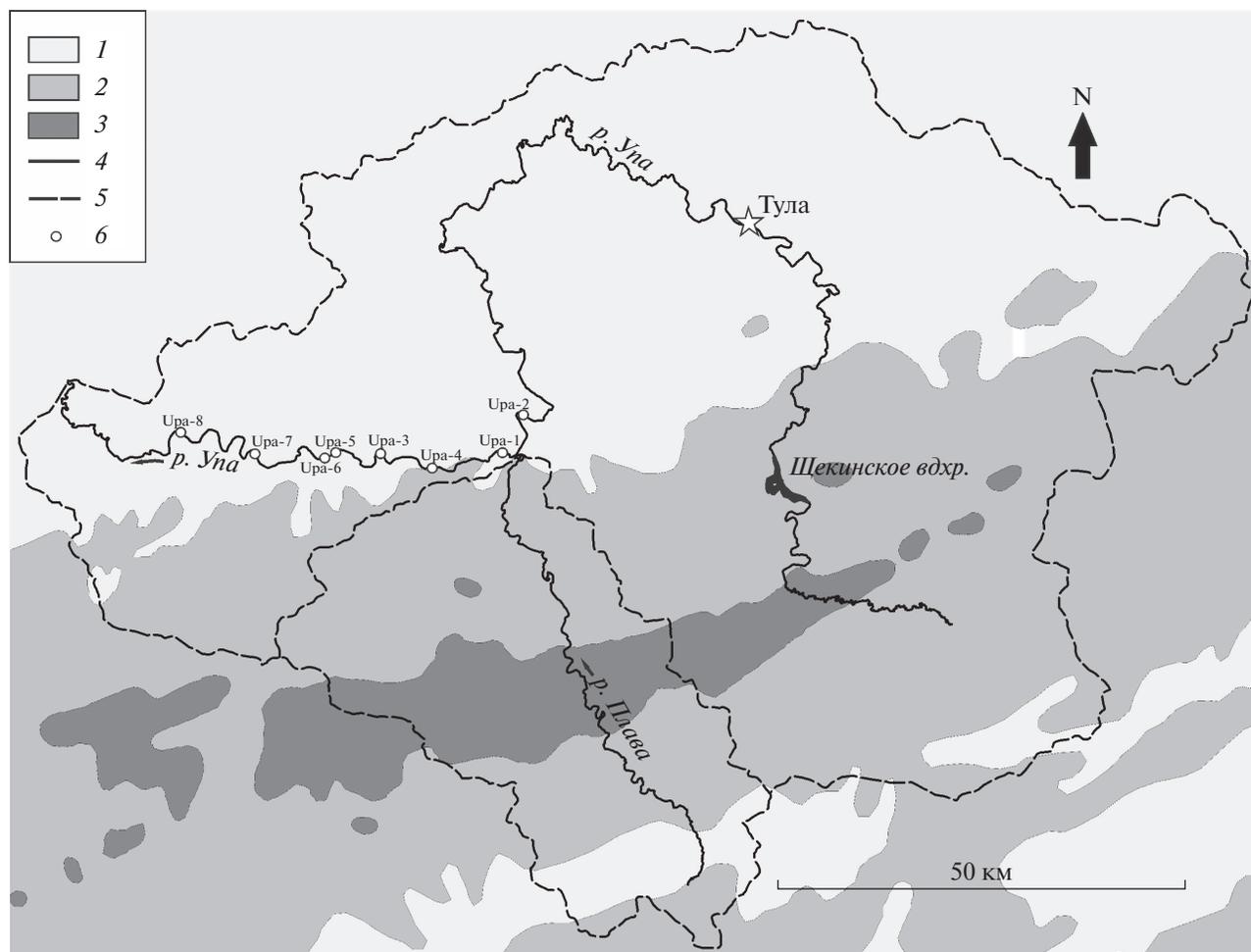


Рис. 1. Бассейн р. Упа, его радиоактивное загрязнение и расположение участков отбора проб на пойме по длине реки. Плотность загрязнения территории: 1 – $< 1 \text{ Ки/км}^2$, 2 – $1\text{--}5 \text{ Ки/км}^2$, 3 – $5\text{--}15 \text{ Ки/км}^2$; 4 – рр. Упа и Плава; 5 – границы речных бассейнов; 6 – участки отбора проб.

возникает возможность оценить влияние изменения водности на уровень загрязнения транспортируемых наносов. Внутригодовые и межгодовые изменения коэффициента поверхностного стока в бассейне определяются как периодичностью выпадения стокоформирующих ливней, которые в своем большинстве носят локальный характер, затрагивая только ограниченные площади на водосборе, так и условиями формирования стока в период ежегодно наблюдающегося весеннего снеготаяния, охватывающего одновременно весь речной бассейн.

Увеличение коэффициента поверхностного стока в период снеготаяния способствует росту смыва почвы с распаиваемых склонов и хорошо коррелирует с формированием максимальных расходов в период прохождения весеннего половодья в реке и с долей более радиоактивно загрязненных наносов склонового происхождения, поступающих в реки за счет поверхностного смыва с пашни. Следовательно, тенденция значительного

сокращения поверхностного стока в период снеготаяния в последние десятилетия, подтвержденная наблюдениями на стоковых площадках [22], обуславливает сокращение как объема половодья, так и доли продуктов талого смыва, поступающих в реки.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки характера распространения радиоактивного загрязнения по долине р. Упа на участке ниже устья р. Плава на ее пойме было выбрано 8 площадок, расположенных на относительно близкой высоте над межennым урезом (0.8–1.3 м). Особое внимание уделялось отсутствию поступления склоновых наносов с бортов долины (в результате оползневой деятельности, овражных размывов и склонового смыва). Одна из площадок (Ур-2) была выбрана непосредственно выше по течению от впадения р. Плава. Здесь степень радиоактивного загрязнения пойменных

отложений характеризовала уровни содержания ^{137}Cs в наносах, поступивших в речной поток на участке от нижнего бьефа Щекинского водохранилища до устья р. Плава. Остальные пойменные площадки располагались вдоль по долине р. Упа от впадения в нее р. Плава и до устья (см. рис. 1). Абсолютная высота всех площадок была определена с помощью DGPS съемки, что позволило привязать их к измерительному створу гидрологического поста у д. Орлово, расположенного непосредственно ниже по течению от устья р. Плава. Все площадки, кроме одной (Ур-5), были заложены на участках относительно прямолинейного русла с отсутствием притоков. Площадка Ур-5 располагалась на пойме в 10 м ниже по течению от устья небольшого правобережного притока, дренирующего северную, менее радиоактивно загрязненную часть бассейна р. Упа. На каждой площадке для изучения строения пойменных отложений и отбора проб для определения содержания ^{137}Cs был заложен и подробно описан почвенный разрез глубиной не менее 0.9 м. Послойный отбор проб проводился из передней стенки разреза с фиксированной площадью 15×15 см до глубины 80 см. В верхних 60 см толщи пробы отбирались с шагом 3 см, в интервале 60–80 см – с шагом 5 см. Глубина отбора была установлена, исходя из имеющихся данных о среднегодовых темпах аккумуляции наносов на низкой пойме рек Среднерусской возвышенности [18, 27] с таким расчетом, чтобы гарантированно отобрать горизонт, соответствующий дневной поверхности в момент выпадения из атмосферы ^{137}Cs весной 1986 г.

Отобранные образцы отложений доставлялись в лабораторию, высушивались до абсолютно сухого состояния при температуре 105°C и взвешивались. Высушенные пробы размалывали и просеивали через сито с диаметром отверстий 1 мм для создания однородности изучаемого образца. Гамма-спектрометрический анализ проб почвы проводили на гамма-спектрометре фирмы ООО НИИП “Грин Стар Инструментс”: СКС-07(09) П-Г-Р, Россия.

По результатам анализа были построены эпюры вертикального распределения ^{137}Cs в пойменных отложениях, отражающие процесс накопления аллювиальных наносов и содержащегося в них ^{137}Cs после его выпадения в 1986 г. Слои с максимальными концентрациями ^{137}Cs , превышающими 100 Бк/кг, соответствуют поверхности поймы на период его выпадения из атмосферы в мае 1986 г. В первые годы после выпадения происходило заглубление слоя с максимальной концентрацией на 2–4 см за счет вертикальной миграции ^{137}Cs [24, 29, 32, 35]. Корректировка значений концентрации ^{137}Cs в связи с различиями в

гранулометрическом составе наносов не проводилась.

Гидрологические данные о расходах воды в р. Упа и р. Плава были собраны из томов Гидрологической изученности (до 2007 г.), а также из интернет-источников (с 2008 г.) (www.skhiivh.ru). Наблюдения за стоком воды и наносов на г/п д. Орлово (площадь водосбора р. Упа 8210 км^2) проводятся с 1946 г. На р. Плава с 1956 по 1962 г. функционировал гидрологический пост в г. Плавск (площадь водосбора 810 км^2). С учетом изменения площади водосбора данные по расходам воды были пересчитаны для устья р. Плава (площадь водосбора 1880 км^2).

Анализ данных за период 1956–1962 гг. показывает, что половодье на рр. Плава и Упа проходит синхронно, примерно в одни и те же сроки (рис. 2а). Продолжительность половодья составляет около 30 дней. Основной подъем уровней и расходов воды и возможное затопление поймы, во время которого на ней происходит отложение наносов, наблюдается в апреле. Имеющиеся данные по стоку воды позволили оценить примерное соотношение между расходами рр. Плава и Упа в период половодья (в среднем 1 : 6.4). Чтобы учесть влияние нарастания расходов воды вниз по течению р. Упа на уменьшение концентраций ^{137}Cs была проведена оценка бокового притока, доля которого возрастает от г/п д. Орлово до устья до 20%.

Оценка условий затопления поймы р. Упа осуществлялась стандартными методами, применяемыми в гидрологических исследованиях [2, 3]. Продолжительность и глубина затопления для пунктов наблюдений рассчитывались в зависимости от высоты поймы на г/п д. Орлово с учетом высоты поймы в пунктах Ур-4, Ур-5, Ур-6, Ур-7. При превышении отметками уровня высоты поймы по разнице этих значений рассчитывалась глубина затопления, а суммарное количество дней, когда величина уровня воды превышала высоту поймы, соответствует продолжительности затопления в данном году. При этом при расчетах учитывалась аккумуляция наносов, которая привела к росту уровня поймы за период с 1986 по 2014 г. (за 29 лет) на 0.78 м.

Для оценки изменения уровня дна реки за счет эрозии/аккумуляции в пункте р. Упа–д. Орлово привлекались также имеющиеся сведения об измеренных расходах и уровнях воды до 1973 г., использовавшиеся для построения кривых $Q = f(H)$, где Q – измеренный расход воды, H – измеренный уровень воды. Анализ полученных кривых показал, что в период с 1950 по 1961 г. в этом пункте происходила аккумуляция наносов, в дальнейшем (до 1973 г.) сменявшаяся эрозией (рис. 2б).

С учетом этих сведений проводилась оценка изменчивости средней и суммарной продолжи-

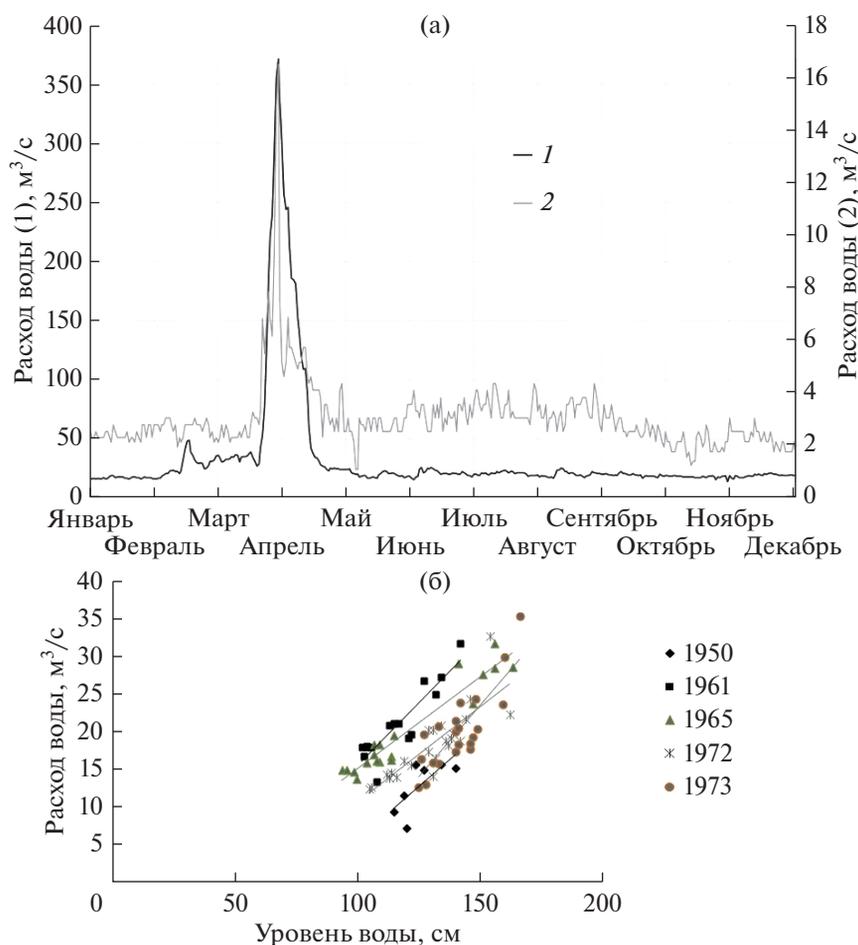


Рис. 2. Гидрограф р. Упа—д. Орлово (1) и р. Плава—г. Плавск (2) за 1957 г. (а) и изменение положения кривой $Q = f(H)$ в разные годы на р. Упа—д. Орлово (б).

тельности и глубины затопления за пятилетия (1986–1990, 1991–1995, 1996–2000, 2001–2006 (ввиду отсутствия сведений за 2002 г.), 2007–2011 гг.) по длине реки, а также от пятилетия к пятилетию.

Для характеристики многолетних колебаний максимального стока воды использовались разностно-интегральные кривые (РИК), позволяющие выявить циклы пониженного, повышенного и среднего стока. Для их построения рассчитывались модульные коэффициенты [6].

Проверка однородности рядов водного стока по критериям Стьюдента и Фишера [20] показала, что наблюдения на р. Упа неоднородны — в период с 1949 по 2013 г. наблюдалась тенденция понижения максимального стока воды (рис. 5б).

Для анализа изменений во времени содержания ^{137}Cs в пойменных отложениях было принято допущение о равномерном накоплении наносов по 5-летиям в период после 1986 г. Необходимость подобного подхода вызвана отсутствием информации о темпах аккумуляции аллювиальных наносов на каждом из участков поймы р. Упа

по годам. Следует подчеркнуть, что данное допущение, несомненно, искажает фактические темпы накопления наносов, которые могут коррелировать с частотой затопления данного участка поймы. Судя по изменениям режима стока воды, вероятно, происходило постепенное снижение темпов аккумуляции аллювиальных наносов на исследуемых площадках, обусловленное с одной стороны снижением уровней максимальных расходов воды, а с другой — повышением высоты поймы за счет накопления наносов. С учетом этого на основании данных об изменениях уровней и расходов воды в период весеннего половодья и положения разрезов относительно меженного уровня были рассчитаны периодичность и продолжительность затопления различных участков поймы и их соотношения с изменением концентрации ^{137}Cs в отдельных слоях отложений. Данный анализ проводился только для разрезов Ур-4–Ур-7, так как в этих разрезах отбор проб проводился за один полевой сезон.

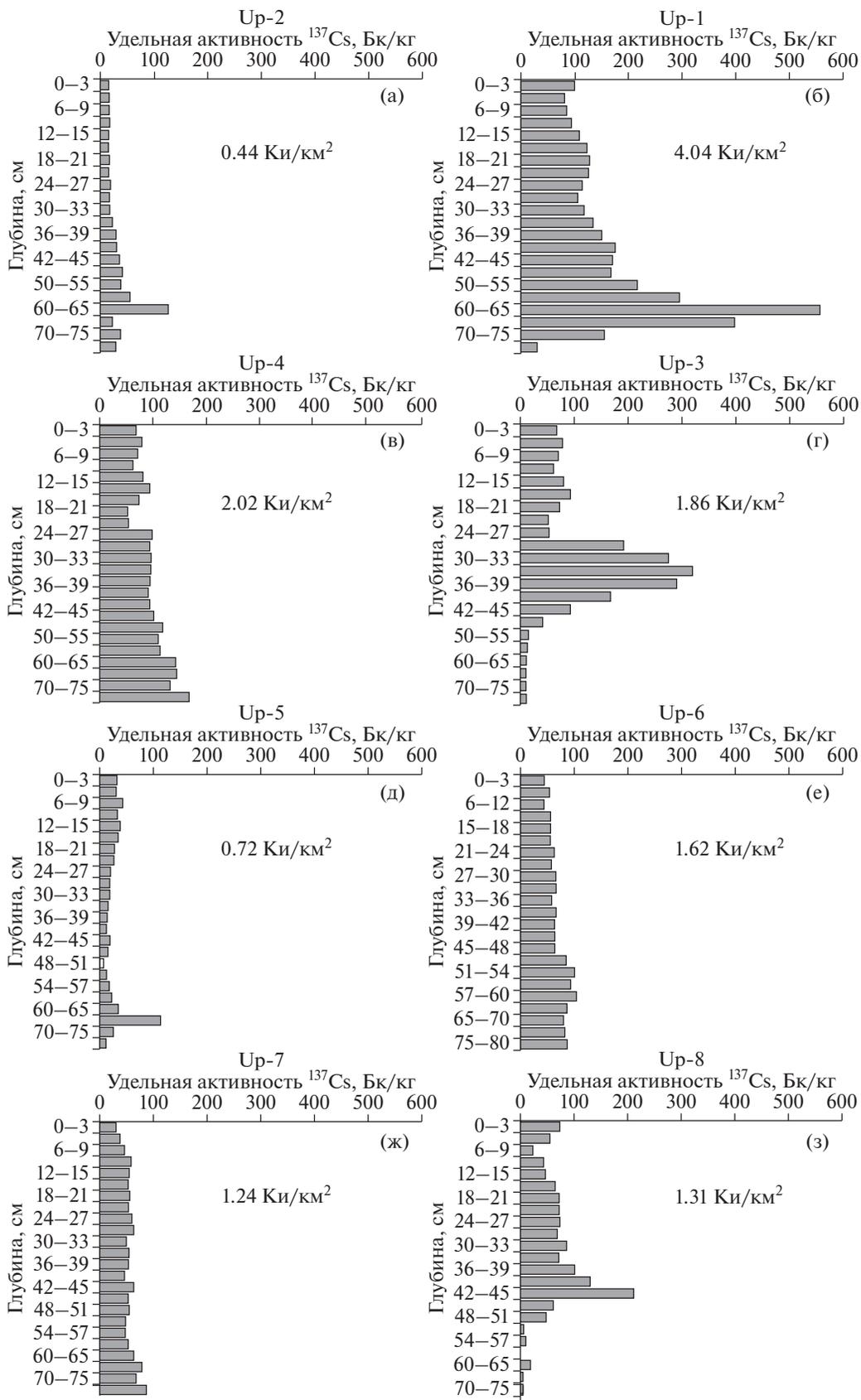


Рис. 3. Эпоны вертикального распределения величин удельной активности ^{137}Cs в пойменных отложениях р. Упа. 0.44 Ки/км² – плотность загрязнения в месте заложения разреза.

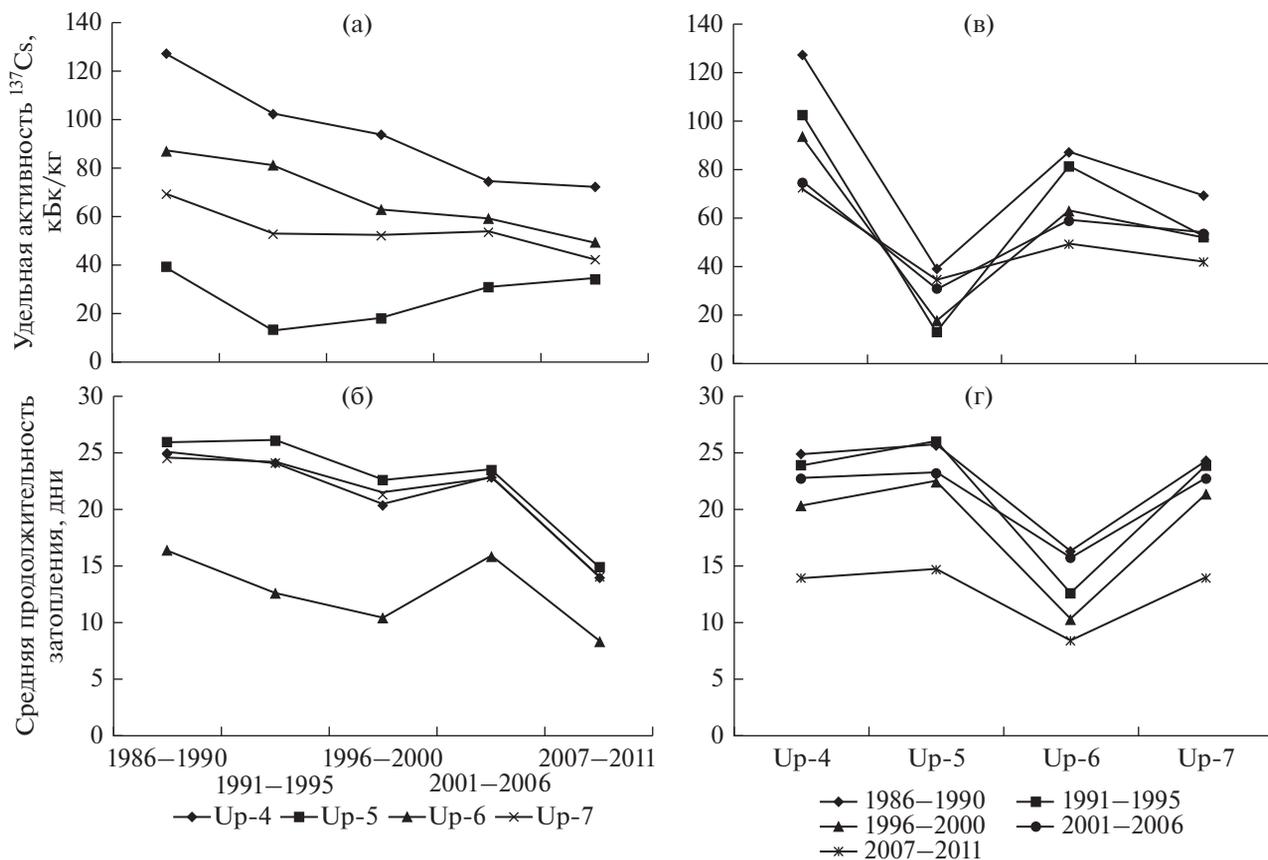


Рис. 4. Тренды изменений по пятилетним периодам: величин удельной активности ^{137}Cs в отложениях поймы на разных площадках (а) и по длине долины р. Упа (в); средней продолжительности затопления поймы на разных площадках (б) и по длине долины р. Упа (г).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На исследуемом участке долины р. Упа уровни радиоактивного загрязнения в пересчете на момент выпадения ^{137}Cs весной 1986 г. не превышали $1.0 \text{ Ки}/\text{км}^2$ ($37 \text{ kBq}/\text{м}^2$), снижаясь в приустьевой части до $0.54 \text{ Ки}/\text{км}^2$ ($20 \text{ kBq}/\text{м}^2$) (см. рис. 1). В настоящее время, даже с учетом процесса радиоактивного распада, плотность радиоактивного загрязнения почв для большинства разрезов оказалась больше $1.0 \text{ Ки}/\text{км}^2$, что связано с накоплением аллювиальных наносов, загрязненных ^{137}Cs . Минимальные запасы ^{137}Cs зафиксированы в разрезе Ур-2, расположенном выше по течению от устья р. Плава (рис. 3а) (табл. 1). Среднегодовые темпы отложения материала на этом участке составили $2.6 \text{ см}/\text{г.}$, что полностью совпадает с темпами аккумуляции на участке поймы с разрезом Ур-1, расположенном ниже по течению от устья р. Плава (см. табл. 1). Можно предположить, что если бы не было привноса сильнозагрязненного материала со стоком р. Плава, то на всем протяжении долины р. Упа до ее устья сохранялись бы уровни загрязнения поймы, близкие по величине к зафиксированным в

разрезе Ур-2. Фактически, несмотря на постепенное снижение суммарных запасов ^{137}Cs вниз по течению реки, даже с учетом только радиоактивного распада плотность радиоактивного загрязнения исследованных пойменных площадок вплоть до приустьевого участка как минимум вдвое превышает уровни начального загрязнения (см. табл. 1). Исключением является разрез Ур-5 (рис. 3д), который располагается на участке поймы р. Упа с преобладанием аккумуляции очень слабо загрязненных ^{137}Cs наносов, поступающих из правобережного притока, устье которого расположено в 10 м выше по течению от разреза. Среднегодовые темпы аккумуляции аллювиальных наносов здесь составили $2.3 \text{ см}/\text{год}$, что близко по величине к скорости осадконакопления на участках поймы р. Упа, расположенных выше и ниже впадения р. Плава. В разрезах Ур-4, Ур-6 и Ур-7 при отборе проб не удалось дойти до слоев с максимальной концентрацией ^{137}Cs , хотя нарастающий с глубиной тренд изменения содержания ^{137}Cs позволяет предположить, что черномыльский пик или располагается относительно близко, или был частично размыт. Вероятно, темпы аккумуляции наносов на данных участках выше,

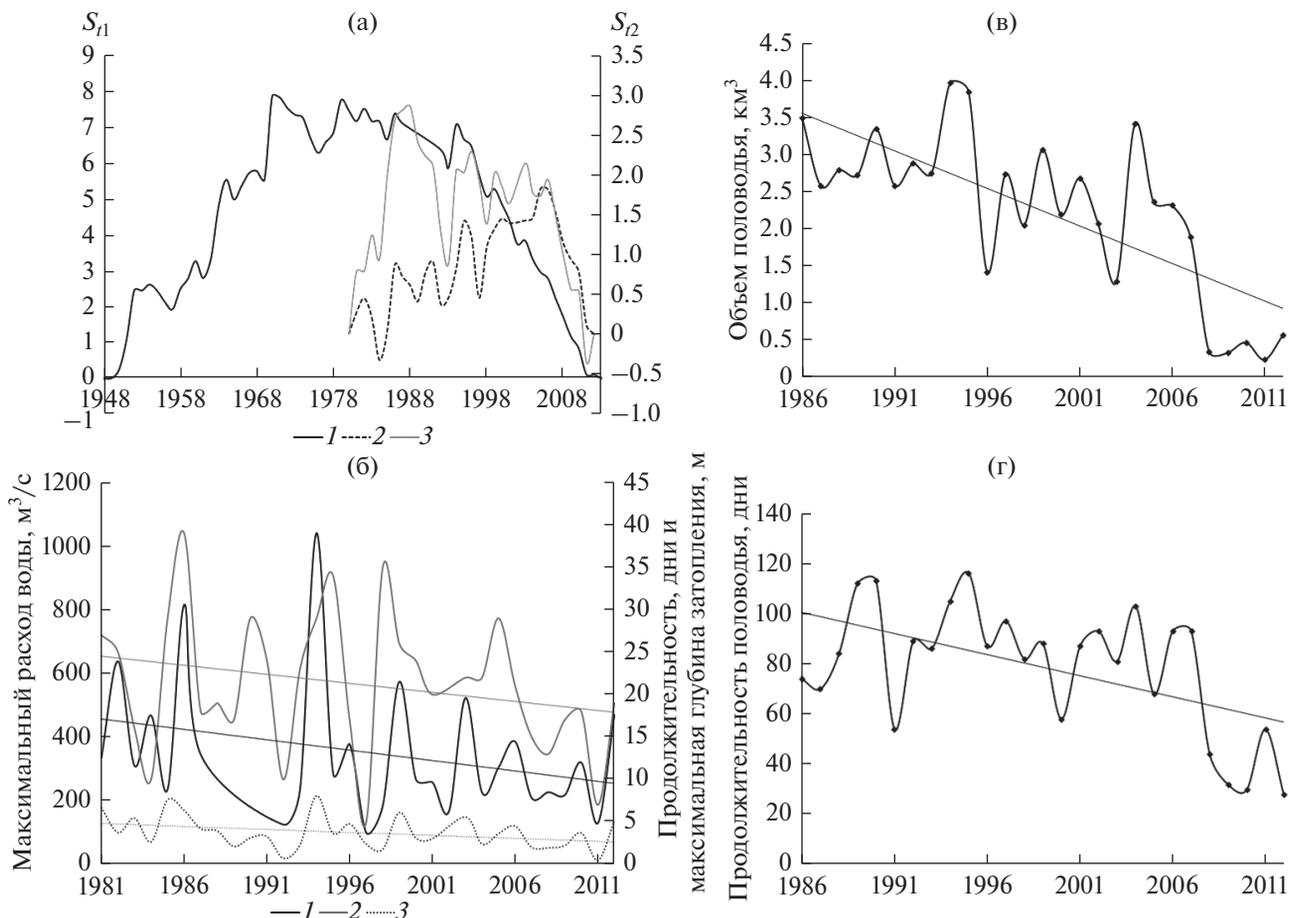


Рис. 5. Разностно-интегральные кривые максимального стока воды (1, S_{11} , $\text{м}^3/\text{с}$), продолжительности (2, S_{12} , дни) и максимальной глубины (3, S_{2} , м) затопления в р. Упа (д. Орлово) (а), изменчивость: (б) – максимальных расходов воды (1), продолжительности (2) и максимальной глубины (3) затопления, (в) – объема половодья, (г) – продолжительности половодья в р. Упа (д. Орлово). Прямые наклонные линии на графиках б, в, г – тренды изменений характеристик стока воды за оцениваемые интервалы времени.

чем на остальных, так как ширина низкой поймы здесь составляет менее 3 м. Минимальные темпы аккумуляции выявлены на участках, где расположены разрезы Ур-3 и Ур-8 (в среднем 1.4 и 1.5 $\text{см}/\text{г}$ соответственно). Достаточно существенные различия в темпах накопления пойменных отложений, вероятно, связаны с различиями в условиях аккумуляции транспортируемого потоком материала. В частности, важную роль играют локальные препятствия, например, стволы деревьев или кустарников. Как показывают результаты наблюдений за аккумуляцией свежего наилка [23, 27], в гидравлической тени, возникающей за препятствиями, отлагается меньше наносов, так как поток разгружается перед препятствием. Локальные различия в темпах аккумуляции наносов, связанные с характерной для участков низкой и средней поймы неравномерностью осадконакопления, также оказывают влияние на суммарные запасы ^{137}Cs в конкретной точке.

Удельная активность ^{137}Cs в пойменных отложениях и ее изменения во времени и по длине реки зависят от ряда факторов. Ключевую роль играет соотношение бассейновой и русловой составляющей стока наносов, а также соотношения продуктов склонового смыва, поступающих с частей бассейна р. Упа с различными уровнями радиоактивного загрязнения. Следует отметить, что в первое десятилетие после выпадения ^{137}Cs чернобыльского происхождения из атмосферы в целом наблюдалось постепенное и достаточно синхронное снижение содержания ^{137}Cs в отложениях по всем участкам (рис. 4а). Это было связано с уменьшением концентраций ^{137}Cs в наносах, формирующихся вследствие эрозии на пашне, которое было обусловлено перемешиванием выпавшего на поверхность ^{137}Cs при многократном перепахивании, а также сокращением площади пахотных земель из-за забрасывания пашни начиная с 1991 г. [7]. Это привело к снижению объема наносов склонового происхождения, посту-

Таблица 1. Основные характеристики радиоактивного загрязнения поймы и темпы накопления наносов на участке среднего и нижнего течения р. Упа

№ разреза	Высота над меженным уровнем, м	Год отбора проб	Плотность загрязнения отложений ^{137}Cs , Ки/км ²	Удельная активность ^{137}Cs в отложениях чернобыльского пика, кБк/кг	Темпы аккумуляции, см/год
Ур-2	1.0	2009	0.44	126	2.6
Ур-1	0.8	2009	4.04	557	2.6
Ур-4	0.8	2014	2.02	169 *	≥2.9
Ур-3	1.0	2010	1.86	319	1.4
Ур-5	0.85	2014	0.72	113	2.4
Ур-6	1.28	2014	1.62	—	>3.0
Ур-7	1.32	2014	1.24	—	>3.0
Ур-8	1.5	2015	1.31	212	1.5

* Предположительно, чернобыльский пик, поскольку содержащая изотоп цезия толща полностью не пройдена пробоотбором.

пающих в постоянные водотоки. Несмотря на то, что сокращение площади пашни в бассейне р. Плава продолжалось вплоть до 2006 г., отчетливый тренд снижения прослеживается в этот период только для разрезов, расположенных ближе всего к устью р. Плава, в частности, для р. Ур-4 (см. рис. 4а). По мере удаления от ее устья содержание ^{137}Cs в пойменных отложениях, накопившихся в период 1996–2006 гг., постепенно стабилизируется, а в разрезе Ур-5 начиная с 1996–2000 гг., постепенно возрастает (см. рис. 4а). Подобные изменения можно объяснить изменением соотношения вклада наносов руслового и склонового происхождения, поступающих в русло р. Упа из ее притоков на данном участке.

Сопоставление разностно-интегральных кривых (РИК) максимального стока воды, продолжительности и максимальной глубины затопления показало, что их изменения можно считать относительно асинхронными: в период с 1981 по 2005 г. наблюдался рост продолжительности затопления поймы и максимальной глубины затопления, в то время как максимальный расход воды уменьшался, а с 2006 г. происходило синхронное снижение всех указанных выше характеристик вплоть до 2011 г. (рис. 5а). С 1981 г. происходит снижение колебаний продолжительности затопления и его максимальной глубины (см. рис. 5б).

Существенные изменения за период с 1986 по 2012 г. претерпели характеристики половодья. Наиболее интенсивно происходило уменьшение объема половодья: если в 1986–2005 гг. его средний объем составлял порядка 2.7 км³, то в 2008–2012 гг. его величина уменьшилась до 0.23–0.56 км³, т.е. произошло сокращение в 5–12 раз (рис. 5в). Одновременно в последнее десятилетие наблюдалось уменьшение продолжительности периода половодья в 2–3 раза по сравнению с его средней продолжительностью в 1986–2005 гг. (рис. 5г).

Анализ изменчивости характеристик затопления поймы р. Упы в створах площадок Ур-4, Ур-5, Ур-6, Ур-7 по пятилетиям позволил выявить некоторые тренды. Изменение средней продолжительности затопления поймы по длине реки происходило синхронно во все пятилетия (рис. 4г). Изменение удельной активности ^{137}Cs в отложениях поймы по длине реки происходило асинхронно. Увеличение продолжительности затопления поймы соответствует снижению концентраций ^{137}Cs ; при обратной ситуации наблюдается увеличение значений удельной активности (рис. 4в). Анализ изменчивости суммарной продолжительности затопления поймы в совокупности с флуктуациями величин удельной активности ^{137}Cs в отложениях поймы по пятилетиям показал, что их колебания происходят синхронно.

Сопоставление изменений основных параметров половодий и удельной активности ^{137}Cs в пойменных отложениях позволяет сделать вывод о том, что наиболее важным параметром является объем половодья, который по существу косвенно определяет долю склонового стока и смыва в суммарном стоке наносов. В период 2007–2012 гг. резкое сокращение объема половодья обусловлено практически полным отсутствием поверхностного стока со склонов. В результате сток наносов в реке формировался за счет размыва дна и подмываемых берегов рек. Поэтому концентрации ^{137}Cs в пойменных отложениях на участках Ур-5, Ур-6 и Ур-7 в этот период оказались максимально близки по величине (см. рис. 4а). В частности, постоянное увеличение после 1996 г. содержания ^{137}Cs в пойменных отложениях участка Ур-5 связано со снижением доли относительно незагрязненных ^{137}Cs наносов, поступающих из расположенного в 10 м выше по течению притока с залежным водосбором. Сокращение стока воды способствовало уменьшению стока наносов, который формируется на данном водосборе, в том

числе и за счет русловых размывов. В итоге, доля наносов руслового происхождения, транспортируемых р. Упа, постоянно возрастала и к 2007–2012 гг. стала доминирующей.

Тенденция сокращения поверхностного стока со склонов в период весеннего снеготаяния на Среднерусской возвышенности прослеживается с начала 1990-х годов, а уже в 2000-е, согласно данным мониторинговых наблюдений на стоковых площадках, сток на склонах формировался эпизодически [22]. Следовательно, в этот период в стоке реки увеличивалась доля наносов, формирующихся за счет размыва русел постоянных водотоков. С 1986 г. в руслах рек частично переоткладывался, а затем в период половодья транспортировался вниз по течению, довольно большой объем наносов, поступивших с водосбора при формировании ливневого стока и смыва. Мутность воды при ливневом стоке со склонов при сильном смыве может на два и более порядков превышать мутность воды при стоке в период снеготаяния [13].

Выявленный тренд снижения удельной активности ^{137}Cs в пойменных отложениях р. Упа, обусловленный значительным сокращением стока наносов, поступающих в реки бассейна с пахотных угодий, может смениться увеличением содержания ^{137}Cs при усилении поверхностного стока и смыва в период снеготаяния. В частности, после половодья 2015 г., которое превышало по своим уровням среднемноголетние значения, удельная активность ^{137}Cs в наносах, отложившихся на пойме на приустьевом участке р. Упа (рис. 3з), в 3–4 раза превысила содержание ^{137}Cs в наносах, отложившихся в предшествующие 2–3 года и была сопоставима с содержанием ^{137}Cs в поверхностных отложениях поймы на участке Ур-4 (см. рис. 3в), расположенном на небольшом расстоянии от устья р. Плава (см. рис. 1).

ВЫВОДЫ

В бассейне р. Упа ежегодное весеннее снеготаяние вызывает подъемы уровней воды в марте–апреле, когда проходит 95–98% стока наносов и транспортируемых с ними загрязняющих веществ, включая ^{137}Cs . Фрагментарно представленные участки низкой и средней поймы р. Упа от впадения р. Плава до устья являются ловушками транспортируемых рекой наносов и ^{137}Cs , переносимого совместно с ними. Среднегодовые темпы накопления пойменного аллювия за период 1986–2014 гг. изменялись в интервале 1.5–2.7 см/г. Это привело к накоплению ^{137}Cs , которое по своим суммарным запасам превышает уровни начального радиоактивного загрязнения поймы после аварии на Чернобыльской АЭС. Вследствие относительно небольшой площади участков средней и низкой поймы здесь откладывается только

незначительная часть переносимых р. Упа наносов. Основной объем зафиксированного на взвешенных наносах ^{137}Cs поступает в р. Ока.

Выявлен тренд снижения объема половодного стока р. Упа, особенно ярко выраженный после 2007 г., который обусловлен сокращением доли поверхностного стока со склонов и переходом его в подземный сток. В результате произошло сокращение бассейновой составляющей в стоке наносов рр. Упа и Плава, что привело в этот период к снижению воздействия стока р. Плава на загрязнение р. Упа.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена по плану научно-исследовательских работ НИЛ эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева, ГЗ № АААА-А16-116032810084-0 и при финансовой поддержке РФФИ, проект №18-55-50002 ЯФ.

FUNDING

This study was carried out within the research plan of the N.I. Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Channel Processes (state-ordered research theme no. АААА-А16-116032810084-0) and with financial support received from the RFBR (project no. 18-55-50002).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Белоруссии. М.—Минск: АСПА Россия—Беларусь, 2009. 139 с.
2. Барышников Н.Б. Морфология, гидрология и гидравлика пойм. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 280 с.
3. Барышников Н.Б. Речные поймы (морфология и гидравлика). Л.: Гидрометеиздат, 1978. 152 с.
4. Вакуловский С.М., Никитин А.И., Чумичев В.Б. и др. Загрязнение цезием-137 и стронцием-90 водных объектов на территории, подвергшейся воздействию выбросов аварийного блока ЧАЭС // Метеорология и гидрология. 1991. № 7. С. 64–73.
5. Голосов В.Н., Иванова Н.Н., Литвин Л.Ф., Сидорчук А.Ю. Баланс наносов в речных бассейнах и деградация малых рек Русской равнины // Геоморфология. 1992. № 4. С. 69–71.
6. Евстигнеев В.М. Речной сток и гидрологические расчеты. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1990. 304 с.
7. Иванов М.М., Голосов В.Н., Беляев В.Р. Анализ строения рельефа для оценки коэффициента доставки наносов бассейна реки Плавы (Тульская область) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2017. № 3. С. 14–23.
8. Иванова Н.Н., Шамигурина Е.Н., Голосов В.Н., Беляев В.Р., Маркелов М.В., Парамонова Т.А., Эврар О. Оценка перераспределения ^{137}Cs экзогенными процессами в днище долины р. Плава (Тульская область) после аварии на Чернобыльской АЭС // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2014. Т. 1. № 1. С. 24–34.
9. Изразль Ю.А., Вакуловский С.М., Ветров В.А., Петров В.Н.Э., Ровинский Ф.Я., Стукин Е.Д. Черно-

- быль: радиоактивное загрязнение природных сред. Л.: Гидрометеозидат, 1990. 296 с.
10. Израэль Ю.А., Квасникова Е.В., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. Глобальное и региональное загрязнение цезием-137 европейской территории бывшего СССР // Метеорология и гидрология. 1994. № 5. С. 5–9.
 11. Израэль Ю.А., Квасникова Е.В., Назаров И.М., Стукин Е.Д., Цатуров Ю.С. Радиоактивное загрязнение территории стран СНГ и Европы // Экологическая безопасность на пороге XXI века: Международная конференция. 1999. С. 88–89.
 12. Коробова Е.М., Чижикова Н.П., Линник В.Г. Распределение ^{137}Cs по гранулометрическим фракциям в профиле аллювиальных почв поймы р. Ипать и ее притока р. Булдынка (Брянская область) // Почвоведение. 2007. Т. 40. № 4. С. 367–379. <https://doi.org/10.1134/S1064229307040023>
 13. Ларионов Г.А. Эрозия и дефляция почв. М: Изд-во Моск. ун-та, 1993. 198 с.
 14. Линник В.Г. Техногенные радионуклиды в поймах р. Теча и среднего течения р. Енисей // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2011. № 4. С. 24–30.
 15. Линник В.Г., Говорун А.П., Волосов А.Г. Радионуклидное загрязнение пойменных почв реки Плава // Современные проблемы загрязнения почв. 2004. С. 63–65.
 16. Линник В.Г., Говорун А.П., Моисеенко Ф.В., Белус Н.М. Пространственное распределение Cs-137 в пойменных почвах р. Ипать // Устойчивость почв к антропогенным воздействиям. 2002. С. 448.
 17. Литвин Л.Ф. География почв сельскохозяйственных земель России. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2002. 255 с.
 18. Маркелов М.В., Голосов В.Н., Беляев В.Р. Изменение скорости аккумуляции на поймах малых рек в центре Русской равнины // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2012. № 5. С. 70–76.
 19. Фридман Ш.Д., Квасникова Е.В., Глушко О.В., Голосов В.Н., Иванова Н.Н. Миграция цезия-137 в сопряженных комплексах Среднерусской возвышенности // Метеорология и гидрология. 1997. № 5. С. 45–55.
 20. Христофоров А.В. Теория случайных процессов в гидрологии. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1994. 139 с.
 21. Шамшурина Е.Н., Голосов В.Н., Иванов М.М. Пространственно-временная реконструкция поля выпадения чернобыльского ^{137}Cs на почвенный покров в верховьях бассейна реки Локны // Радиационная биология. Радиэкология. 2016. № 4. С. 414–425.
 22. Varabanov A. T., Dolgov S. V., Koronkevich N. I., Panov V. I., Petel'ko A. I. Surface Runoff and Snowmelt Infiltration into the Soil on Plowlands in the Forest-Steppe and Steppe Zones of the East European Plain // Euras. Soil Sci. 2018. № 51. P. 66–72.
 23. Belyaev V.R., Golosov V.N., Markelov M.V., Evrard O., Ivanova N.N., Paramonova T.A., Shamshurina E.N. Using Chernobyl-derived ^{137}Cs to document recent sediment deposition rates on the river Plava floodplain // Hydrol. Processes. 2013. V. 27. № 6. P. 807–821.
 24. Bulgakov A.A., Konoplev A.V., Popov V.E., Bobovnikova Ts.I., Siverina A.A., Shkuratova I.G. Mechanisms of the vertical migration of long-lived radionuclides in soils within 30 kilometers of the Chernobyl nuclear power station // Soviet Soil Sci. 1991. V. 23. № 5. P. 46–51.
 25. Gennadiyev A.N., Golosov V.N., Chernyanskii S.S., Markelov M.V., Kovach R.G., Belyaev V.R., Ivanova N.N. Comparative assessment of the contents of magnetic spherules, ^{137}Cs , and ^{210}Pb in soils as applied for the estimation of soil erosion // Euras. Soil Sci. 2006. V. 39. № 10. P. 1100–1116.
 26. Golosov V.N. Redistribution of sediments within small river catchments in the agricultural zone of Russia // Geomorphologie. Relief, Processus, Environnement. 1998. V. 4. № 1. P. 53–64.
 27. Golosov V.N., Belyaev V.R., Markelov M.V., Kislenko K.S. Overbank sedimentation rates on the floodplains of small rivers in central European Russia // Sediment dynamics for a changing future. 2010. V. 337. P. 129–136.
 28. Golosov V.N., Ivanova N.N. Sediment-associated Chernobyl ^{137}Cs redistribution in the small basins of Central Russia // Applied Geomorphology: Theory and Practice. 2002. P. 165–181.
 29. Golosov V.N., Walling D.E., Konoplev A.V., Ivanov M.M., Sharifullin A.G. Application of bomb- and Chernobyl-derived radiocaesium for reconstructing changes in erosion rates and sediment fluxes from croplands in areas of European Russia with different levels of Chernobyl fallout // J. of Environ. Radioact. 2018. V. 186. P. 78–89.
 30. Golosov V.N. Special considerations for areas affected by Chernobyl fallout / F. Zapata (Eds.). Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides. Kluwer Academic Publishers Dordrecht, The Netherlands, 1. 2002. P. 165–184.
 31. He Q., Walling D.E. Interpreting particle size effects in the adsorption of ^{137}Cs and unsupported ^{210}Pb by mineral soils and sediments // J. Environ. Radioact. 1996. V. 30. № 2. P. 117–137.
 32. Kagan L.M., Kadatsky V.B. Depth migration of Chernobyl originated ^{137}Cs and ^{90}Sr in soils of Belarus // J. Environ. Radioact. 1996. V. 33. № 1. P. 27–39.
 33. Mamikhin S.V., Golosov V.N., Paramonova T.A., Shamshurina E.N., Ivanov M.M. Vertical distribution of ^{137}Cs in alluvial soils of the Lokna River floodplain (Tula oblast) long after the Chernobyl accident and its simulation // Eurasian Soil Sci. 2016. V. 49. № 12. P. 1432–1442. <https://doi.org/10.1134/S1064229316120103>
 34. Panin A.V., Walling D.E., Golosov V.N. The role of soil erosion and fluvial processes in the post-fallout redistribution of Chernobyl-derived caesium-137: a case study of the Lapki catchment, Central Russia // Geomorphology. 2001. V. 40. № 3–4. P. 185–204.
 35. Szerbin P., Koblinger-Bokori E., Koblinger L., Végvári I., Ugron Á. Caesium-137 migration in Hungarian soils // Sci. Total Env. 1999. V. 227. № 2–3. P. 215–227.
 36. Walling D.E., Golosov V.N., Kvasnikova E.V., Vandecasteele C. Radioecological aspects of soil pollution in small catchments // Eurasian Soil Sci. 2000. V. 33. № 7. P. 776–784.
 37. Walling D.E., Bradley S.B. Rates and patterns of contemporary floodplain sedimentation: a case study of the River Culm, Devon, UK // GeoJournal. 1989. V. 19. № 1. P. 53–62.
 38. Zheleznyak M., Demchenko R., Khursin S., Kuzmenko Yu., Tkulich P., Vitjuk N. Mathematical modeling of radionuclide dispersion in the Pripjat-Dnieper aquatic system after Chernobyl accident // Sci. Total Env. 1992. V. 112. P. 89–114.

Evaluation of ¹³⁷Cs Redistribution in Floodplain Sediments of the Upa River (Tula Oblast) After the Chernobyl Accident

V. N. Golosov^{1,2,3,#}, L. V. Kuksina¹, M. M. Ivanov^{1,2}, N. L. Frolova¹, N. N. Ivanova¹, and V. R. Belyaev¹

¹Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

²Institute of Geography RAS, Moscow, Russia

³Kazan Federal University, Kazan, Russia

#e-mail: golossov@gmail.com

Received August 8, 2018; revised May 15, 2019; accepted October 3, 2019

Variations of ¹³⁷Cs content in suspended sediments during flood periods along the river valley bottom and in time since 1986 are revealed based on the analysis in low floodplain deposits and hydrological regime of the Upa River in the river reach between place of the Plava River confluence and the Upa river mouth. It is established that for the period 1986–2014 years there was a decrease in the proportion of sediment and sediment-associated ¹³⁷Cs of basin origin in the river sediment yield, especially noticeable after 2006. Reduction the ¹³⁷Cs content in floodplain sediments along the Upa river on the reach from the confluence with the river Plava, which are drained the most radioactively contaminated part of the river Upa basin, and up to the mouth is synchronically change with river water discharge as the catchment area increases. Contemporary ¹³⁷Cs inventory in sediments of the low floodplain of the Upa river exceed the initial levels of its contamination after the initial fallout of Chernobyl-derived ¹³⁷Cs. The increase of inventory is associated with the accumulation of contaminated sediments at a rate of 1.5–2.7 cm/yr. during floods.

Keywords: radioactive pollution, specific activity, flood, floodplain, hydrological regime, accumulation, pollution density, water content, Chernobyl

REFERENCES

1. *Atlas sovremennykh i prognoznykh aspektov posledstviy avarii na Chernobyl'skoi AES na postradavshykh territoriyakh Rossii i Belorussii* [Atlas of the Current and Forecasted Aspects of Chernobyl' Fallout Consequences in Russian and Belorussian Damaged Territories]. Moscow, Minsk: ASPA Rossiya – Belarus', 2009. 139 p.
2. Baryshnikov N.B. *Morfologiya, gidrologiya i gidravlika poim* [Morphology, Hydrology and Hydraulics of Floodplain]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1984. 280 p.
3. Baryshnikov N.B. *Rechnye poimy (morfologiya i gidravlika)* [River Floodplains (Morphology and Hydraulics)]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1978. 152 p.
4. Vakulovskii S.M., Nikitin A.I., Chumichev V.B., et al. Pollution of water bodies by cesium-137 and strontium-90 in the territory under Chernobyl' fallout impact. *Meteorol. Gidrol.*, 1991, no. 7, pp. 64–73. (In Russ.).
5. Golosov V.N., Ivanova N.N., Litvin L.F., Sidorchuk A.Yu. Sediment budget in river basins and small river degradation in the Russian plain. *Geomorfologiya*, 1992, no. 4, pp. 69–71. (In Russ.).
6. Evstigneev V.M. *Rechnoi stok i gidrologicheskie raschety* [River Runoff and Hydrological Estimations]. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 1990. 304 p.
7. Ivanov M.M., Golosov V.N., Belyaev V.R. Analysis of topography structure for the evaluation of sediment delivery ratio within the Plava River basin (Tula Oblast). *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2017, no. 3, pp. 14–23. (In Russ.).
8. Ivanova N.N., Shamshurina E.N., Golosov V.N., Belyaev V.R., Markelov M.V., Paramonova T.A., Evrard O. Assessment of ¹³⁷Cs redistribution by exogenic processes in the Plava River valley bottom (Tula oblast) after the Chernobyl accident. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2014, no. 1, pp. 24–34. (In Russ.).
9. Izrael' Yu.A., Vakulovskii S.M., Vetrov V.A., Petrov V.N.E., Rovinskii F.Ya., Stukin E.D. *Chernobyl': radioaktivnoe zagryaznenie prirodnykh sred* [Chernobyl: Radioactive Contamination of Natural Environments]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1990. 296 p.
10. Izrael' Yu.A., Kvasnikova E.V., Nazarov I.M., Fridman Sh.D. Global and regional pollution of the former USSR territory by ¹³⁷Cs. *Meteorol. Gidrol.*, 1994, no. 5, pp. 5–9. (In Russ.).
11. Izrael' Yu.A., Kvasnikova E.V., Nazarov I.M., Stukin E.D., Tsaturov Yu.S. Radioactive pollution of CIS and European countries. In *Ekologicheskaya bezopasnost' na poroge XXI veka: Mezhdunarodnaya konferentsiya* [Ecological Safety at the Turn of the 21st Century: International Conference]. 1999, pp. 88–89. (In Russ.).
12. Korobova E.M., Chizhikova N.P., Linnik V.G. Distribution of ¹³⁷Cs in the particle-size fractions and in the profiles of alluvial soils on floodplains of the Iput and its tributary Buldynka Rivers (Bryansk oblast). *Eurasian Soil Sci.*, 2007, vol. 40, no. 4, pp. 367–379. doi 10.1134/S1064229307040023
13. Larionov G.A. *Eroziya i deflyatsiya pochv* [Soil Erosion and Deflation]. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 1993. 198 p.
14. Linnik V.G. Induced radionuclide in the Techa and middle course of the Enisey Rivers floodplains. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2011, no. 4, pp. 24–30. (In Russ.).
15. Linnik V.G., Govorun A.P., Volosov A.G. Radionuclide pollution of the floodplain soils of the Plava River. In *Sovremennye problemy zagryazneniya pochv* [Modern Problems of Soil Pollution]. Moscow, 2004, pp. 63–65. (In Russ.).

16. Linnik V.G., Govorun A.P., Moiseenko F.V., Belous N.M. Spatial distribution of Cs-137 in floodplain soils of the Iput' River. In *Ustoichivost' pochv k antropogennym vozdeistviyam* [Soil Resistance to Anthropogenic Impacts]. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 2002. 448 p. (In Russ.).
17. Litvin L.F. *Geografiya pochv sel'skokhozyaistvennykh zemel' Rossii* [Soils Geography in Agricultural Regions of Russia]. Moscow: Akademkniga Publ., 2002. 255 p.
18. Markelov M.V., Golosov V.N., Belyaev V.R. Changes in the sedimentation rates on the floodplains of small rivers in the central Russian Plain. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2012, no. 5, pp. 70–76. (In Russ.).
19. Fridman Sh.D., Kvasnikova E.V., Glushko O.V., Golosov V.N., Ivanova N.N. Migration of Cs-137 in conjugate complexes of the Central Russian Upland. *Meteorol. Gidrol.*, 1997, no. 5, pp. 45–55. (In Russ.).
20. Khristoforov A.V. *Teoriya sluchainykh protsessov v gidrologii* [Theory of the Random Processes in Hydrology]. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 1994. 139 p.
21. Shamshurina E.N., Golosov V.N., Ivanov M.M. Spatio-temporal reconstruction of Cs-137 fallout on soil cover in upper part of the Lokny River. *Radiatsionnaya Biologiya. Radioekologiya*, 2016, no. 4, pp. 414–425. (In Russ.).
22. Barabanov A.T., Dolgov S.V., Koronkevich N.I., Pano V.I., Petel'ko A.I. Surface runoff and snowmelt infiltration into the soil on plowlands in the forest-steppe and steppe zones of the east European plain. *Eurasian Soil Sci.*, 2018, no. 51, pp. 66–72. doi 10.1134/S1064229318010039
23. Belyaev V.R., Golosov V.N., Markelov M.V., Evrard O., Ivanova N.N., Paramonova T.A., Shamshurina E.N. Using Chernobyl-derived ¹³⁷Cs to document recent sediment deposition rates on the River Plava floodplain (Central European Russia). *Hydrol. Process.*, 2013, vol. 27, no. 6, pp. 807–821. doi 10.1002/hyp.9461
24. Bulgakov A.A., Konoplev A.V., Popov V.E., Bobovnikova Ts.I., Siverina A.A., Shkuratova I.G. Mechanisms of the vertical migration of long-lived radionuclides in soils within 30 kilometers of the Chernobyl nuclear power station. *Soviet Soil Sci.*, 1991, vol. 23, no. 5, pp. 46–51.
25. Gennadiyev A.N., Golosov V.N., Chernyanskii S.S., Markelov M.V., Kovach R.G., Belyaev V.R., Ivanova N.N. Comparative assessment of the contents of magnetic spherules, ¹³⁷Cs, and ²¹⁰Pb in soils as applied for the estimation of soil erosion. *Eurasian Soil Sci.*, 2006, vol. 39, no. 10, pp. 1100–1116. doi 10.1134/S1064229306100085
26. Golosov V.N. Redistribution of sediments within small river catchments in the agricultural zone of Russia. *Geomorphologie. Relief, Processus, Environnement*, 1998, vol. 4, no. 1, pp. 53–64.
27. Golosov V.N., Belyaev V.R., Markelov M.V., Kislenco K.S. Overbank sedimentation rates on the floodplains of small rivers in central European Russia. In *Sediment Dynamics for a Changing Future*. Banasik K., Horowitz A.J., Owens P.N., Stone M., Walling D.E., Eds. IAHS Press, 2010, pp. 129–136.
28. Golosov V.N., Ivanova N.N. Sediment-associated Chernobyl ¹³⁷Cs redistribution in the small basins of Central Russia. In *Applied Geomorphology: Theory and Practice*. Allison R.J., Ed. John Wiley & Sons Ltd, 2002, pp. 165–181.
29. Golosov V.N., Walling D.E., Konoplev A.V., Ivanov M.M., Sharifullin A.G. Application of bomb- and Chernobyl-derived radiocaesium for reconstructing changes in erosion rates and sediment fluxes from croplands in areas of European Russia with different levels of Chernobyl fallout. *J. Environ. Radioact.*, 2018, vol. 186, pp. 78–89. doi 10.1016/j.jenvrad.2017.06.022
30. Golosov V.N. Special considerations for areas affected by Chernobyl fallout. In *Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides*. Zapata F., Ed. Dordrecht: Springer, 2002, pp. 165–183. doi 10.1007/0-306-48054-9_8
31. He Q., Walling D.E. Interpreting particle size effects in the adsorption of ¹³⁷Cs and unsupported ²¹⁰Pb by mineral soils and sediments. *J. Environ. Radioact.*, 1996, vol. 30, no. 2, pp. 117–137.
32. Kagan L.M., Kadatsky V.B. Depth migration of Chernobyl originated ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in soils of Belarus. *J. Environ. Radioact.*, 1996, vol. 33, no. 1, pp. 27–39.
33. Mamikhin S.V., Golosov V.N., Paramonova T.A., Shamshurina E.N., Ivanov M.M. Vertical distribution of ¹³⁷Cs in alluvial soils of the Lokna River floodplain (Tula oblast) long after the Chernobyl accident and its simulation. *Eurasian Soil Sci.*, 2016, vol. 49, no. 12, pp. 1432–1442. doi 10.1134/S1064229316120103
34. Panin A.V., Walling D.E., Golosov V.N. The role of soil erosion and fluvial processes in the post-fallout redistribution of Chernobyl-derived caesium-137: a case study of the Lapki catchment, Central Russia. *Geomorphology*, 2001, vol. 40, nos. 3–4, pp. 185–204.
35. Szerbin P., Koblinger-Bokori E., Koblinger L., Végvári I., Ugron Á. Caesium-137 migration in Hungarian soils. *Sci. Total Environ.*, 1999, vol. 227, nos. 2–3, pp. 215–227.
36. Walling D.E., Golosov V.N., Kvasnikova E.V., Vandecasteele C. Radioecological aspects of soil pollution in small. *Eurasian Soil Sci.*, 2000, vol. 33, no. 7, pp. 776–784.
37. Walling D.E., Bradley S.B. Rates and patterns of contemporary floodplain sedimentation: a case study of the River Culm, Devon, UK. *GeoJournal*, 1989, vol. 19, no. 1, pp. 53–62.
38. Zheleznyak M.J., Demchenko R.I., Khursin S.L., Kuzmenko Yu.I., Tklich P.V., Vitiuk N.Y. Mathematical modeling of radionuclide dispersion in the Pripjat-Dnieper aquatic system after Chernobyl accident. *Sci. Total Environ.*, 1992, vol. 112, pp. 89–114.