

УДК 551.4+631.2

## ДОЛГОСРОЧНЫЕ ТРАНСФОРМАЦИИ ЧЕРНОБЫЛЬСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ ЭРОЗИОННО-АККУМУЛЯТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ

М. М. Иванов<sup>1),2)</sup>, Н. Н. Иванова<sup>1)</sup>, В. Н. Голосов<sup>1),2)</sup>

<sup>1)</sup> *Географический факультет, МГУ им. М. В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, 119991, Москва, Россия, [ivanovm@geogr.msu.ru](mailto:ivanovm@geogr.msu.ru)*

<sup>2)</sup> *Лаборатория геоморфологии, Институт Географии РАН, Старомонетный пер., 29, стр. 4, 119017, Москва, Россия, [ivanovm@igras.ru](mailto:ivanovm@igras.ru)*

Рассмотрены пространственно-временные изменения чернобыльского загрязнения <sup>137</sup>Cs, вызванные процессами эрозии почвы, внутрибассейновым перераспределением загрязнённого материала и формированием стока наносов в бассейне р. Упы (Россия, Тульская обл.). Исследование трансформации загрязнения играет важную роль не только в рамках проблемы выявления вторичных радиоэкологических рисков, но также позволяет глубже понимать функционирование флювиальных геоморфологических систем в меняющихся ландшафтно-климатических условиях.

**Ключевые слова:** эрозия; сток наносов; радиоактивное загрязнение; Cs-137.

## LONG-TERM TRANSFORMATIONS OF CHERNOBYL CONTAMINATION ASSOCIATED WITH EROSION AND ACCUMULATION PROCESSES

M. M. Ivanov<sup>1),2)</sup>, N. N. Ivanova<sup>1)</sup>, V. N. Golosov<sup>1),2)</sup>

<sup>1)</sup> *Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Leninskie gory, 1, 119991, Moscow, Russia, [ivanovm@geogr.msu.ru](mailto:ivanovm@geogr.msu.ru)*

<sup>2)</sup> *Laboratory of Geomorphology, Institute of Geography RAS, Staromonetnyi per., 29, str. 8., 119017, Moscow, Russia, [ivanovm@igras.ru](mailto:ivanovm@igras.ru)*

The current state of research on spatial changes in radioactive Chernobyl pollution associated with soil erosion processes, redistribution of contaminated material inside river basins and formation of sediment yield are observed. The Upa River basin (Russia, Tula region) is considered. The study of contamination transformation plays an important role in the framework of the problem of secondary radioecological risk. As well, it allows for a deeper understanding of the functioning of fluvial geomorphological systems in changing landscape and climatic conditions.

**Keywords:** erosion; sediment yield; radioactive contamination; Cs-137.

Деятельность временных и постоянных водных потоков является основным агентом переноса вещества на поверхности Земли, включая

техногенные загрязнители. Долгосрочные прогнозы трансформации радиоактивного загрязнения требуют подробного изучения механизмов и путей латеральной миграции радионуклидов в составе стока наносов. На территориях Центральной России, подвергшихся интенсивному чернобыльскому загрязнению, наиболее детальные исследования перераспределения наносов и миграции, связанного с ними  $^{137}\text{Cs}$  на протяжении более 30-ти лет производятся в бассейне р. Упы [1,2]. Бассейн р. Упы площадью около 9500 км<sup>2</sup> расположен в северной части Среднерусской возвышенности в Тульской области. Почвенный покров в пределах междуречных пространств представлен черноземами выщелоченными и оподзоленными, а также тёмно-серыми лесными почвами. Почвообразующей породой являются карбонатные лессовидные суглинки. Большая по площади южная часть бассейна с высокой долей распахиваемых территорий в земельном фонде была сильно загрязнена после аварии на ЧАЭС в апреле 1986 г.

Обрабатываемые склоны междуречий являются основным источником формирования бассейновой составляющей стока наносов и  $^{137}\text{Cs}$ , сорбированного почвенными частицами. При наблюдаемой тенденции к сокращению талого стока [3] среднегодовые потери запасов  $^{137}\text{Cs}$  с обрабатываемых склонов в бассейне р. Плавы (левый приток Упы) результате эрозионного смыва, оценённого с помощью комбинированного использования эрозионного моделирования и радиоцезиевого метода, составили не более 0,2 % [4], что в целом мало меняет пространственную картину загрязнения на большей части площади.

Почти 40 лет, прошедшие после чернобыльской катастрофы, дают возможность изучать динамику изменений радиоактивного загрязнения путем повторных полевых обследований водосборных бассейнов, охваченных наблюдениями десятилетия назад. Перспективным направлением становится метод повторного интегрального пробоотбора (re-sampling) на обрабатываемых склонах по густой сети точек. Проведение таких исследований в пределах компактных пахотных водосборов может использоваться в качестве альтернативы гораздо более дорогостоящему и трудозатратному инструментальному мониторингу эрозионно-аккумулятивных процессов, который необходим в связи с климатическими изменениями и изменениями севооборотов. Высокий уровень содержания  $^{137}\text{Cs}$  в исследованном регионе выступает в качестве преимущества, поскольку снижает временные затраты для проведения аналитических работ и дает возможность получать высоко детальную пространственную картину трансформации загрязнения на основе использования низко инвазивных методик полевых измерений гамма-активности при помощи портативных детекторов. Система мониторинга с использованием метода повторного пробоотбора на территориях, затронутых интенсивными чернобыльскими

выпадениями, даёт возможность отслеживать трансформацию радиоактивного загрязнения сельскохозяйственных угодий и оценивать потенциальные радиоэкологические риски, связанные с латеральной миграцией техногенных радионуклидов.

Основные изменения запасов  $^{137}\text{Cs}$  происходят на участках локальной аккумуляции загрязнённых наносов в пределах долинно-балочной сети. Большая часть наносов, переносимых временными потоками с пахотных склонов, переоткладывается в днищах сухих долин (балок). Интенсивность переотложения наносов зависит главным образом от уклона днища. Согласно оценке, проведенной для бассейна Плавы (приток р. Упы) за период 1986-2009 гг., около 60 % отложений, смытых с пахотных склонов, остались в пределах водосборов 1–3 Хортон порядка [5]. Повторный послонный отбор проб в аккумулятивных толщах на ряде контрольных участков показал, что за период с 2010 г. имеет место высокая пространственно-временная неравномерность темпов осадконакопления. Наблюдается как рост, так и уменьшение темпов аккумуляции вплоть до повторной мобилизации материала. Доля наносов, выносимых за пределы водосборов долин 4-го Хортон порядка, как правило, не превышает 10 % [6, 7].

Исследования пойменных комплексов рек Локны и Плавы показали значительные различия в темпах аккумуляции на различных уровнях поймы. На низкой пойме за счёт накопления загрязнённых наносов суммарные запасы  $^{137}\text{Cs}$ , даже с учётом потерь от радиоактивного распада, не уменьшились. При этом интенсивное накопление все менее загрязнённого материала на низкой пойме привело к снижению мощности формируемой дозы [9,10]. На средней пойме в силу сокращения талого стока со склонов, и, как следствие, снижения случаев ее затопления, аккумуляция за постчернобыльский период незначительная [8].

В исследуемом регионе широко развита практика строительства искусственных водоемов, которые с высокой эффективностью улавливают сток наносов из отдельных сегментов речных бассейнов. Недостаток данных мониторинга загрязнения может быть частично компенсирован исследованиями вертикального распределения радионуклидов в таких водоемах. Постепенное сокращение концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в переносимых наносах [11] и высокие темпы аккумуляции приводят к изоляции наиболее грязных толщ от водной массы и гидробионтов, что в целом имеет позитивный радиоэкологический эффект. Вместе с этим интенсивная аккумуляция наносов приводит к постепенному сокращению ёмкости водоемов и к трудностям в их эксплуатации. Потенциальным риском является запланированный или произвольный спуск водоемов, который приведёт к повторному выбросу радионуклидов в речные системы [12].

Регулярный послойный отбор проб почвы с последующей транспортировкой и лабораторной обработкой образцов требует значительного времени. Это делает процесс получения окончательных оценок довольно длительным. Опыт работы в бассейне р. Упы показал, что между полевым исследованием и публикацией результатов проходит несколько лет. Высокий уровень радиоактивного загрязнения позволяет использовать портативные гамма-детекторы для быстрого определения относительного распределения  $^{137}\text{Cs}$  в отложениях и выделения "чернобыльского пика" [13]. Исследования в бассейне р. Упы показали, что полевая спектрометрия может значительно ускорить получение данных. Однако с ее помощью невозможно определить абсолютные значения удельной активности и концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в отложениях, что достижимо только путем исследования образцов с фиксированной геометрией. Точность определения вертикального распределения  $^{137}\text{Cs}$  также значительно выше в случае лабораторного анализа послойных проб. Таким образом, измерения *in situ* могут лишь дополнять существующие методы.

### Библиографические ссылки

1. Иванов М. М., Голосов В. Н., Иванова Н. Н. Баланс наносов и миграция  $^{137}\text{Cs}$  в зоне чернобыльского загрязнения: опыт и итоги исследований в бассейне р. Плавы, Тульская область // Геоморф. и палеогео., 2023, Т. 54, № 1. С. 55–73.
2. Golosov V., Ivanov M. Chapter 4. Quantitative assessment of lateral migration of the Chernobyl-derived  $^{137}\text{Cs}$  in contaminated territories of the East European plain. *In Behavior of Radionuclides in the Environment II Chernobyl*. Springer Singapore. P. 195–226.
3. Барабанов А. Т., Долгов С. В., Коронкевич Н. И., Панов В. И., Петелько А. И. Поверхностный сток и инфильтрация в почву талых вод на пашне в лесостепной и степной зонах Восточно-Европейской равнины // Почвовед. 2018. № 1. С. 62–69.
4. Ivanov M. M., Ivanova N., Golosov V. Sediment and particulate  $^{137}\text{Cs}$  budget studies in Ura River basin: History, results, and prospects // LAND, 2023, V. 12. № 1. 175 p.
5. Belyaev V. R., Shamshurina E. N., Markelov M. V., Golosov V. N., Ivanova N. N., Bondarev V. P., Paramonova T. A., Evrard O., Lio Soon Shun N., Otte C., Lefevre I., Bonte P. Quantification of river basin sediment budget based on reconstruction of the post-Chernobyl particle-bound  $^{137}\text{Cs}$  redistribution // IAHS Publ. 2012, V. 356. P. 394–403
6. Фридман Ш. Д., Квасникова Е. В., Глушко О. В., Голосов В. Н., Иванова Н. Н. Миграция цезия-137 в сопряжённых комплексах Среднерусской возвышенности // Метеор. и гидролог. 1997. № 5. С. 45–55.
7. 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. Radiact.* 2018, V. 186. P. 78–89.
8. Мамихин С. В., Голосов В. Н., Парамонова Т. А., Шамшурина Е. Н., Иванов М. М. Вертикальное распределение  $^{137}\text{Cs}$  в аллювиальных почвах поймы р. Локна (Тульская область) в отдаленной после аварии на ЧАЭС и его моделирование // Почвовед. 2016. № 12. С. 1521–1533.

9. *Иванов М. М., Комиссарова О. Л., Кошовский Т. С., Цыплёнков А. С.* Применение полевой гамма-спектрометрии и дозиметрии для исследования осадконакопления на пойме малой равнинной реки в зоне радиоактивного загрязнения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2021. № 1. С. 120–127.
10. *Иванова Н. Н., Шамигурина Е. Н., Голосов В. Н., Беляев В. Р., Маркелов М. В., Парамонова Т. А., Эврал О.* Оценка перераспределения  $^{137}\text{Cs}$  экзогенными процессами в днище долины р. Плава (Тульская область) после аварии на Чернобыльской АЭС // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2014. № 1. С. 24–34
11. *Konoplev A. V., Ivanov M. M., Golosov V. N., Konstantinov E. A.* Reconstruction of long-term dynamics of Chernobyl-derived  $^{137}\text{Cs}$  in the Upa River using bottom sediments in the Scheckino reservoir and semi-empirical modelling // IAHS Publ. 2019. V. 381. P. 95–99.
12. *Ivanov M. M., Konoplev A. V., Walling D. E., Konstantinov E. A., Gurinov A. L., Ivanova N. N., Kuzmenkova N. V., Tsyplenkov A. S., Ivanov M. A., Golosov V. N.* Using reservoir sediment deposits to determine the longer-term fate of Chernobyl-derived  $^{137}\text{Cs}$  fallout in the fluvial system // Environ. Pollut. 2021. V. 274, 116588.
13. *Иванов М. М., Иванова Н. Н.* Экспресс-анализ вертикального распределения  $^{137}\text{Cs}$  в почве для оценки темпов эрозионно-аккумулятивных процессов в зоне интенсивного радиоактивного загрязнения // Почвоведение. 2023. № 4. С. 510–520.