

УДК 551.435:621.039.86(470.312)

БАЛАНС НАНОСОВ И МИГРАЦИЯ ^{137}Cs В ЗОНЕ ЧЕРНОБЫЛЬСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ: ОПЫТ И ИТОГИ ИССЛЕДОВАНИЙ В БАССЕЙНЕ р. ПЛАВЫ, ТУЛЬСКАЯ ОБЛАСТЬ[#]

© 2023 г. М. М. Иванов^{1,2,*}, В. Н. Голосов^{1,2}, Н. Н. Иванова¹

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия

² Институт географии РАН, Москва, Россия

*E-mail: ivanovm@bk.ru

Поступила в редакцию 22.04.2022 г.

После доработки 03.09.2022 г.

Принята к публикации 10.11.2022 г.

В пределах регионов РФ с высокими уровнями чернобыльского загрязнения перераспределение наносов и миграция перемещаемого с ними ^{137}Cs во всех звеньях флювиальной сети наиболее детально изучено в бассейне Плавы. В статье проанализированы опубликованные результаты исследований по изучению темпов эрозии на пашне и переотложения смытого с обрабатываемых земель материала в различных зонах аккумуляции в бассейне р. Плавы, полученные на основе использования набора методов, включая радиоцезиевый. По данным количественных оценок темпов эрозии и аккумуляции в различных звеньях флювиальной сети составлен детальный баланс наносов для бассейна р. Плавы за пост-чернобыльский период. Было выявлено, что смываемый с пашни материал преимущественно переоткладывается на распаханых склонах междуречий и необрабатываемых склонах балок (38%) и в днищах балок (27–38%). Часть наносов, доставленных склоновым стоком и временными водотоками со склонов междуречий в днища речных долин, переотложилась на речных поймах (10–11%), а оставшаяся часть (13–25%) перешла в сток наносов рек. Полученная оценка вклада бассейновой составляющей в сток наносов р. Плавы несколько завышена в силу специфики использованных для расчета смыва почв с пашни эрозионных моделей. Установлено, что за прошедшие с момента аварии на Чернобыльской АЭС более чем за 25 лет потери запасов ^{137}Cs вследствие эрозии почвы составил около 5% (менее 0.2% ежегодно). При данной структуре баланса наносов, в которой сток речных наносов составляет не более четверти от общего количества смытого материала, только порядка 1% от исходных выпадений ^{137}Cs было вынесено за пределы бассейна Плавы. Обозначены основные перспективные направления исследований перераспределения наносов в речных бассейнах равнин умеренного пояса с использованием ^{137}Cs в качестве техногенного трассера.

Ключевые слова: эрозионно-аккумулятивные процессы, радиоцезиевый метод, ^{137}Cs , чернобыльское загрязнение, флювиальная геоморфология

DOI: 10.31857/S294917892301005X, **EDN:** GQAUPI

1. ВВЕДЕНИЕ

Перераспределение материала внутри любой природной системы с той или иной точностью может быть формализовано в виде баланса вещества, отдельные составляющие которого могут быть оценены независимо друг от друга и сведены к единому равенству. Наиболее часто балансовый подход используется во флювиальной геоморфологии при изучении формирования стока нано-

сов в пределах водосборов различных размеров (Dietrich, Dunne, 1978; Walling, 1983; Slaymaker, 2003; Walling, Collins, 2008; Hinderer, 2012). В условиях недостатка или полного отсутствия мониторинговых данных балансовый метод является единственным способом оценить объемы и определить источники потоков наносов в речных бассейнах со значительным антропогенным воздействием. Пространственные рамки и временной интервал для оценки баланса наносов зависят от поставленных целей и могут быть масштабированы практически до любых размеров. Высокодетальные исследования могут охватывать водосборы размером от первых (Nyssen et al., 2008; Minella et al., 2014) до нескольких сотен км² (Trimble,

[#] Ссылка для цитирования: Иванов М.М., Голосов В.Н., Иванова Н.Н. Баланс наносов и миграция ^{137}Cs в зоне Чернобыльского загрязнения: опыт и итоги исследований в бассейне р. Плавы, Тульская область // Геоморфология и палеогеография. 2023. Т. 54, № 1. С. 55–73. <https://doi.org/10.31857/S0435428123010054>; <https://elibrary.ru/GQAUPI>

1999; De Moor, Verstraeten, 2008; Notebaert et al., 2009). Но также аналогичные оценки проводятся для крупных речных бассейнов с площадью в несколько сотен тысяч (Kondolf et al., 2018) и даже миллионов км² (Wang et al., 2007) с той степенью детализации, которую позволяют имеющиеся технические средства и ресурсы.

Антропогенно обусловленное радиоактивное загрязнение в значительной мере актуализирует исследования миграции вещества в составе стока речных наносов (Hogowitz, 1991; Marron, 1992; Miller, 1997; Macklin et al., 1997, 2006; Walling et al., 2003; Byrne et al., 2012). Количественную оценку миграции любых загрязнителей в составе стока наносов можно весьма продуктивно производить с применением балансового подхода. Построение долгосрочных прогнозов трансформации поля загрязнения и возникновения новых экологических рисков невозможно без подробного изучения механизмов и путей латеральной миграции радионуклидов в связи с развитием эрозионно-аккумулятивных процессов (Walling, 2003; Konoplev et al., 2016; Golosov, Ivanov, 2020).

В пределах центра Европейской части России ¹³⁷Cs чернобыльского происхождения зарекомендовал себя, в первую очередь, в качестве надежного хронологического маркера (Golosov et al., 1999a, b; Panin et al., 2001). Его фактически одномоментное поступление на поверхность почвы позволяет точно определять темпы аккумуляции за период с мая 1986 г. Продолжительность пост-чернобыльского периода перекрывает временные рамки оценки современной климатической нормы (1991–2020 гг.). Таким образом, наблюдаемые в течение этого времени тенденции развития эрозионно-аккумулятивных процессов могут рассматриваться в качестве ответа природной среды на трансформацию климата и возможные антропогенные изменения. В частности, при проведении исследований в бассейнах рек Восточно-Европейской равнины необходимо учитывать и существенные изменения площадей пашни и систем землепользования, обусловленные экономическим кризисом начала 1990-х (Hartvigsen, 2014; Golosov et al., 2018a).

Высокие уровни радиоактивного загрязнения почвенного покрова представляют собой не только серьезный экологический вызов, но также открывают широкие методические возможности для исследования эрозионно-аккумулятивных процессов, так как существенно ускоряется процесс измерения содержания радионуклидов в образцах почвы и наносов. На территории Европейской части России наибольшее количество детальных исследований перераспределения наносов и связанного с ними ¹³⁷Cs за последние 30 лет было проведено в бассейне р. Плавы, в котором расположен ареал интенсивного чернобыльского

загрязнения, так называемое Плавское радиоактивное пятно. Цель представленной работы состоит в обобщении результатов многолетних исследований эрозионно-аккумулятивных процессов в различных звеньях флювиальной сети для построения баланса наносов и оценки доли ¹³⁷Cs, поступившего в постоянные водотоки совместно с наносами, от общего объема чернобыльских выпадений в пределах бассейна р. Плавы.

2. ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Бассейн р. Плавы площадью около 1890 км² расположен в северной части Среднерусской возвышенности в пределах Тульской области и относится к бассейну р. Упы. Годовой слой осадков составляет 630 мм, причем в теплое время года в среднем выпадает порядка 460 мм. Почвенный покров в пределах междуречных пространств представлен черноземами выщелоченными и оподзоленными, а также темно-серыми лесными почвами. Основной почвообразующей породой являются карбонатные лёссовидные суглинки (Ратников, 1960). Характерной чертой рельефа являются плоские междуречья, занимающие наибольшие площади в верховьях рек с преимущественно пологими, выпуклыми склонами длиной до нескольких сотен метров. В начале 1980-х гг. плотность загрязнения ¹³⁷Cs бассейна р. Плавы не превышала 7.2 кБк/м² (0.2 Ки/км²). После аварии на ЧАЭС в апреле 1986 г. в результате атмосферных выпадений возникло так называемое “Плавское радиоактивное пятно” с уровнем загрязнения свыше 185 кБк/м² (5 Ки/км²) (Izrael et al., 1996), получившее свое название по городу Плавску, расположенному в его осевой зоне (рис. 1).

В пост-чернобыльский период в бассейнах рек Восточно-Европейской равнины с высокой сельскохозяйственной нагрузкой при замедлении роста оврагов (Пространственно-временные..., 2019) формирование стока наносов происходит, в основном, за счет плоскостного и ручейкового смыва почвы на обрабатываемых склонах (Литвин, 2002). Подавляющая часть мобилизуемого материала при этом остается внутри водосборных бассейнов, в том числе аккумулируясь в днищах долинной сети, что приводит к отмиранию малых постоянных водотоков (Докучаев, 1892; Чернов, 1988; Ковальчук, Штойко, 1992; Бойко и др., 1993; Golosov, Ivanova, 1993; Golosov, Panin, 2006; Golosov et al., 2017). Смыв почвы на обрабатываемых склонах происходит, преимущественно, в результате выпадения дождевых осадков высокой интенсивности в теплый период (Sidorchuk, 1996; Litvin et al., 2003; Sidorchuk, Golosov, 2003; Golosov et al., 2018b; Gusarov et al., 2018; Gusarov, 2019) и

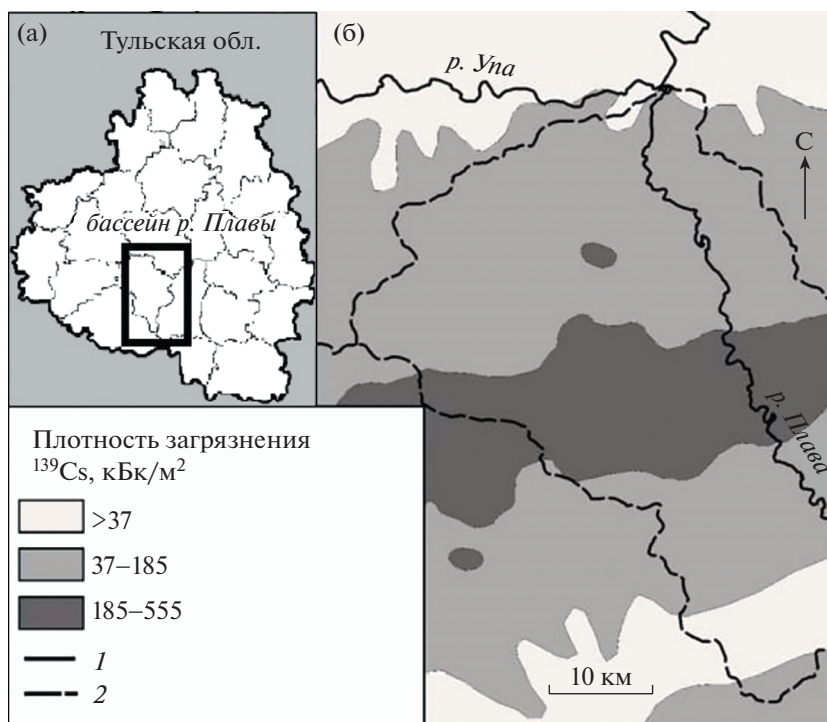


Рис. 1. Расположение бассейна р. Плавы (а) и уровень ее радиоактивного загрязнения (б) (Izrael et al., 1996).
1 – реки, 2 – граница бассейна р. Плавы.

Fig. 1. The location of the Plava River basin (a) and its level of the radioactive contamination (б) (Izrael et al., 1996).
1 – rivers, 2 – the Plava River basin boundary.

во время весеннего снеготаяния при определенных метеорологических условиях (Голосов, 2006).

Для бассейна р. Плавы густота речной сети на протяжении второй половины XX и начала XXI вв. в целом оставалась стабильной (табл. 1). В последние десятилетия даже отмечается тенденция к ее незначительному увеличению.

В формировании бассейновой составляющей стока наносов рек бассейна р. Плавы существенную роль играет процесс смыва в период весеннего снеготаяния. Одним из наиболее важных факторов талого смыва является состояние почвы на момент таяния снега (Голосов, 2006). Сравнительно теплый переход от осеннего к зимнему сезону с устойчивым снежным покровом, который наблюдается последние десятилетия, приводит к тому, что из-за отсутствия или незначительной глубины промерзания верхние горизонты почвы сохраняют высокую инфильтрационную способность. В результате при снеготаянии большая часть запасов воды в снеге фильтруется непосредственно в грунт. Такая тенденция является типичной для лесостепной зоны Восточно-Европейской равнины, особенно для последних двух десятилетий (Барабанов и др., 2018). Сокращение поверхностного стока в периоды весеннего снеготаяния приводит также к снижению продолжительности и уровней половодий на реках, что, в

свою очередь, способствует некоторому уменьшению интенсивности русловой эрозии (Голосов и др., 2020).

Стокоформирующие дождевые осадки, потенциально приводящие к смыву и наблюдающиеся в теплый период года, были подвержены значительным колебаниям. По данным метеостанции в г. Плавске, в 1986–2018 гг. суммы осадков от года к году могли отличаться более чем в два раза. Сравнительная редкость и локальный площадной

Таблица 1. Динамика густоты речной сети в бассейне р. Плавы

Table 1. Dynamics of stream network density in the Plava River basin

Период, годы	Густота речной сети	
	км/км ²	% ³
1930-е ¹	0.209	100
1940-е ¹	0.14	67
1980-е ¹	0.138	66
2000-е ²	0.151	72

Примечание. ¹ – по Golosov, Panin, 2006; ² – по результатам анализа космических снимков; ³ – за 100% принята густота речной сети в 1830-е гг.

Таблица 2. Некоторые характеристики исследованных ключевых водосборов в бассейне р. Плавы
Table 2. Some characteristics of the key catchments within the Plava River basin

Ключевой водосбор	Площадь, км ²	Распаханность, %	Длина тальвегов долинной сети, км
Лапки	2.2	87.3	2.2
Часовенков Верх	39.9	74.7	25
Верховья Локны	35.8	53.2	23
Святой Источник	1.9	69.4	1.9
Ляпуновка	6.2	79	6.1

охват выпадения экстремальных ливней указывают на то, что их вклад в сток наносов рек невелик по сравнению с талым смывом, так как большая часть продуктов ливневого смыва переоткладывается по пути транспортировки с пахотных склонов в постоянные водотоки (Голосов, 1988).

Экономический кризис начала 1990-х гг. привел к существенному сокращению площади пахотных земель в бассейне р. Плавы, и, несмотря на наличие восстановительного экономического роста, их доля продолжала плавно снижаться вплоть до середины второго десятилетия XXI века. Результаты анализа космических снимков показывают следующую динамику доли распаханных земель в земельном фонде: 1985 г. — 84.8%, 2000 г. — 61.8%, 2015 г. — 58.3%.

Типичной практикой последних лет для бассейна р. Плавы является создание новых искусственных водоемов для обеспечения нужд сельского хозяйства и местных населенных пунктов. Вместе с ранее созданными прудами они перехватывают сток наносов со склонов до его поступления в реки на значительных площадях. Наблюдения в лесостепной зоне показали, что малые искусственные водоемы перехватывают практически весь сток наносов (Прыткова, 1981). В результате в бассейне р. Плавы за пост-чернобыльский период сток наносов с 21.7% от его общей площади фактически не поступал в постоянные водотоки.

Снижению объемов наносов, транспортируемых в русла рек, также способствовали сокращение выпаса скота и восстановление естественного растительного покрова на поймах рек, что привело к преобладанию процессов аккумуляции при периодическом затоплении пойменных участков. Кроме того, большая часть наносов, смываемых с распахиваемых бортов речных долин, переотлагается в виде делювиальных шлейфов в тыловых частях пойменных массивов. В последние годы наиболее интенсивно аккумуляция материала, переносимого речным стоком, происходит на поверхности низкой поймы, поскольку только этот пойменный уровень регулярно затапливается (Belyaev et al., 2013a). Транспорт наносов с бортов

долины в русло реки становится возможным только при условии затопления всего днища долины в периоды высоких половодий, повторяемость которых на реках бассейна р. Упы имеет отчетливую тенденцию к снижению в последние 30 лет (Голосов и др., 2020).

Исследования баланса наносов на малых водосборах, располагающихся в центральной и южной частях бассейна р. Плавы, проводились на протяжении более двух десятилетий, начиная с 1990-х гг. (водосборы Лапки и Часовенков Верх) (рис. 2). Основной целью работ было исследование путей перераспределения наносов и связанных с этим изменений запасов ¹³⁷Cs на разных геоморфологических позициях.

Также были обследованы участки пойм р. Локны (левого притока Плавы) и самой р. Плавы. Заложены серии площадок отбора проб отложений для определения вертикального распределения изотопа ¹³⁷Cs на различных уровнях пойм позволили получить информацию о среднемноголетних темпах накопления наносов и ¹³⁷Cs в периоды их затопления (табл. 2, рис. 2).

3. ОБЗОР ИСПОЛЬЗОВАННЫХ МЕТОДОВ

В процессе исследований перераспределения наносов и ¹³⁷Cs в бассейне р. Плавы использовался комплекс методов, совместное применение которых позволяло выявлять пути транспортировки наносов с пашни в постоянные водотоки и оценивать объемы и/или массу перемещаемых и переотлагающихся наносов в пределах различных элементов рельефа.

3.1. Морфометрический анализ. Оценка различных морфометрических параметров малых водосборов с учетом доли и расположения пашни в их пределах позволяет проводить их классификацию. Для условий Среднерусской возвышенности с небольшими различиями относительных высот в пределах бассейнов малых рек такую классификацию наиболее продуктивно проводить по различным параметрам плановых очертаний балочных водосборов, а также их площади, густоте сети тальвегов и формы склонов, опреде-



Рис. 2. Расположение ключевых малых водосборов и площадок исследования пойм в бассейне р. Плавы.

1 – реки; 2 – границы ключевых водосборов; 3 – Лапки, 4 – Часовенков Верх, 5 – Верховья Локны, 6 – Святой Источник, 7 – Ляпуновка; площадки исследования пойм: 8 – на р. Локне, 9 – на р. Плавя.

Fig. 2. The location of the small key catchments and observation sites of the flood plains.

1 – rivers; 2 – the key catchment boundaries; key catchments: 3 – Lapki, 4 – Chasovenkov Verkh, 5 – Upper Lokna, 6 – Svyatoi Istochnik, 7 – Lyapunovka; floodplain observation sites: 8 – of the Lokna River, 9 – of the Plava River.

ляющей способность концентрировать или рассеивать сток. Результаты морфометрического анализа используются для обоснования выбора репрезентативных ключевых водосборов и последующей экстраполяции результатов по оценке перераспределения наносов в их пределах на речные водосборы, не охваченные инструментальными полевыми исследованиями (Иванов и др., 2017; Gusarov et al., 2019).

3.2. Крупномасштабное геоморфологическое картографирование. Геоморфологическая карта в сочетании с картой землепользования используется в качестве основы для выбора точек отбора проб, закладки опорных разрезов и расчета площадей эрозионных и аккумулятивных элементов рельефа, ранжированных в зависимости от темпов протекающих на них процессов (Голосов, Иванова, 2000). Крупномасштабная съемка границ различных элементов рельефа с учетом границ пашни является первым этапом исследований при изучении баланса наносов, который, совместно с использованием цифровой модели рельефа (ЦМР), в дальнейшем позволяет определить пло-

щади зон сноса и аккумуляции и пути транспорта наносов в пределах малых водосборов. Фиксация границ элементов рельефа и определение точных значений высот осуществляются путем использования ручных приемников спутникового позиционирования (GPS и ГЛОНАСС), а также, при необходимости более точных измерений, проведения высокоточной геодезической съемки или съемки с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

3.3. Моделирование процесса эрозии. Математическое моделирование эрозии является одним из наиболее распространенных и экономичных методов оценки темпов смыва и, при наличии возможностей модели, аккумуляции наносов. В работах на ключевых водосборах бассейна Плавы использовался ряд эрозионных моделей (Голосов, 2006; Gusarov et al., 2019; Голосов и др., 2021) иногда в сочетании друг с другом (Belyaev et al., 2012). В частности, была использована эмпирико-математическая модель (ЭММ), объединяющая в себе два уравнения (модуля) оценки расходов наносов, определяемых характером выпадающих

осадков. Для оценки потерь при ливневом и талом смыве в бассейне р. Плавы наиболее часто применялись модифицированная для условий России версия универсального уравнения эрозии почв (Ларионов, 1993) и модифицированная версия модели, разработанной в Государственном гидрологическом институте (Bobrovitskaya et al., 2002) соответственно.

Кроме того, в отдельных случаях использовалась модель *Landsoil*, которая позволяет учитывать и внутриводосборную аккумуляцию наносов (Govers et al., 1994; Cerdan et al., 2002). По сути своей она является усовершенствованной модификацией модели *STREAM* (Sealing and Transfer by Runoff and Erosion related to Agricultural Management), так как дополнительно в модель включен блок расчета темпов механической эрозии почв (Evrard et al., 2009, 2010).

3.4. Масс-балансовая оценка миграции ^{137}Cs за пост-чернобыльский период. Оценка суммарных запасов ^{137}Cs , перемещенного с обрабатываемых склонов и поступившего совместно с наносами в постоянные водотоки, производилась двумя способами, основанными на двух разных допущениях.

Первый вариант расчетов базируется на допущении о том, что перераспределение запасов ^{137}Cs , содержащихся в мобилизованном эрозионными процессами материале, происходит аналогично распределению составляющих баланса наносов, которое оценивается независимо. Таким образом, в количественном плане оценка представляет собой разделение потери запасов ^{137}Cs на обрабатываемых склонах при заданных темпах эрозии пропорционально соотношению различных составляющих баланса наносов:

$$\frac{Q}{W} = \frac{P_Q}{P_W}, \quad (1)$$

где Q – суммарная масса речного стока наносов, кг; W – суммарная масса внутриводосборной аккумуляции, кг; P_Q – запасы ^{137}Cs в стоке наносов, Бк; P_W – запасы ^{137}Cs в переложенных внутри бассейна наносах, Бк.

Во втором варианте используется средневзвешенная величина удельной активности ^{137}Cs в наносах, и перемещенные запасы ^{137}Cs определяются по формуле:

$$P = Q \times c, \quad (2)$$

где P – перемещенные запасы ^{137}Cs , Бк; Q – масса наносов в стоке, кг; c – средняя концентрация ^{137}Cs в стоке наносов за рассматриваемый период, Бк/кг.

При отсутствии мониторинговых наблюдений за стоком перемещаемого в постоянных водотоках совместно с наносами ^{137}Cs , отложения низкой

поймы, наиболее тесно связанные с формированием речного стока, являются единственным источником информации для оценки удельной активности в стоке за пост-чернобыльский период.

3.5. Использование различных хрономаркеров. Использование ^{137}Cs Чернобыльского происхождения в качестве маркера в зонах с высокими уровнями чернобыльского загрязнения позволяет достоверно определять темпы аккумуляции за период с мая 1986 г. на основе анализа эпюр вертикального распределения ^{137}Cs . При этом принимается допущение, что пик содержания радионуклидов маркирует положение дневной поверхности в момент атмосферных выпадений загрязнителя и при дальнейшем последовательном накоплении материала и отсутствии механических нарушений сохраняется в толще наносов (Golosov et al., 2018c). Для определения глубины залегания наиболее загрязненного материала производится послойный отбор проб из стенок разрезов, заложенных на аккумулятивных позициях. Выбирается участок стенки разреза, на котором отсутствуют видимые нарушения в сложении наносов (следы размыва, кротовины, крупные корни травянистой растительности, проникающие на большую глубину и т.п.). Отбор проб проводится с фиксированной площади (обычно 15×15 см) через 2–3 см по глубине. Такой метод позволяет минимизировать ошибки, которые возникают при отборе проб специальным пробоотборником с последующим разделением на слои в лаборатории.

Активное использование каменного угля в качестве топлива в период роста индустриального производства и развития железнодорожного транспорта привело к интенсивным выбросам в окружающую среду продуктов его сгорания (Oldfield et al., 1978), которые могут быть использованы в качестве хронологических маркеров при изучении процесса седиментации. В частности, интерес для датировки отложений представляют так называемые сферические магнитные частицы (СМЧ – Jones, Olson, 1990). В основе метода лежит предположение, что масса перераспределенного в результате эрозии магнитного трассера прямо пропорциональна массе перераспределенного почвенного материала. Было выявлено четкое сокращение содержания СМЧ в эродируемых почвах обрабатываемых склонов по сравнению с почвами склонов с ненарушенным растительным покровом, где смыва не наблюдалось (Olson, Jones, 2001). Временной охват метода магнитного трассера в бассейне р. Плавы составляет в настоящий момент около 150 лет, но использование его сильно лимитировано необходимостью расположения участка исследований вблизи железных дорог, где уголь использовался в качестве паровозного топлива. Совместное использование ме-

тодов магнитного трассера и радиоцезиевого оказалось продуктивным комплексным подходом к оценке темпов эрозии и аккумуляции (Геннадиев и др., 2005, 2010; Olson et al., 2013).

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1. Трансформация радиоактивного загрязнения на склонах под воздействием эрозионно-аккумулятивных процессов. Изучение перераспределения наносов и транспортируемого совместно с ними чернобыльского ^{137}Cs в пределах склонов являлось основным направлением исследований, проводимых в первые десятилетия после аварии, поскольку позволяло выявить динамику первичной трансформации загрязнения и оценить баланс наносов на склонах и склоновых водосборах за пост-чернобыльский период. Исследованиями в середине 1990-х гг. было установлено, что 11 лет, прошедших после выпадения ^{137}Cs чернобыльского происхождения, оказалось слишком мало для существенных потерь запасов ^{137}Cs на обрабатываемых склонах, обусловленных смывом почвы. Был зафиксирован только рост запасов ^{137}Cs на локальных участках аккумуляции наносов, в днищах балок до 1.5–2 раз (Goloso et al., 1999b). Было выявлено, что системы ложбин на обрабатываемых склонах являются важнейшей артерией транспорта наносов в балочную сеть. При этом границы обрабатываемый склон/борт балки, борт балки/днище представляют собой важные рубежи переотложения наносов на пути их транспорта в днища сухих долин (Panin et al., 2001).

В дальнейшем методологическая база исследований перераспределения наносов расширялась. Совместное использование методов магнитного трассера и радиоцезиевого выявило отчетливый тренд к снижению темпов эрозии за пост-чернобыльский период на обрабатываемых склонах лесостепной зоны в сравнении со 150-летним периодом активной распашки. Основными причинами снижения является сокращение интенсивности талого стока на склонах в весеннее время и уменьшение доли пропашных культур в севооборотах по сравнению с серединой XX в. (Голосов и др., 2011). Также использование магнитного трассера показало, что внутрисклоновая аккумуляция наносов зависит от действия комплекса факторов и может проявляться на любом участке по длине склона (Геннадиев и др., 2013). Доставка наносов и ^{137}Cs за пределы распашиваемых склонов определяется не только уклоном и формой склона, но и, в значительной мере, антропогенным рельефом, в том числе напашами (пахотными валами) по границам полей. Напашы являются не только механическим препятствием для наносов, но и важным геохимическим барье-

ром на пути миграции радионуклидов (Zhidkin et al., 2020).

Потери почвы за счет смыва с пахотных склонов привели к закономерному сокращению запасов ^{137}Cs , которое было оценено на основе конверсионных моделей эрозии, увязывающих изменения запасов ^{137}Cs и темпы смыва/аккумуляции вещества (Walling, He, 1999). Расчет по пропорциональной конверсионной модели проводился в обратном порядке: полученная расчетным путем оценка темпов смыва преобразовывалась в относительные изменения запасов (Иванов и др., 2016):

$$X = \frac{10YT}{Bd}, \quad (3)$$

где X – относительное сокращение запасов ^{137}Cs , %; Y – темпы смыва/аккумуляции, т/га/год; T – количество лет; B – плотность почвы, кг/м³; d – глубина вспашки, м.

При осредненном рассчитанном по модели RUSLE значении темпов смыва 6.4 т/га/год на пахотных склонах бассейна р. Плавы (Belyaev et al., 2012), исключая сегменты бассейна, ограниченные в устьевой части искусственными водоемами (Иванов и др., 2017), максимальное значение бассейновой составляющей стока наносов оценивается в 16×10^6 т за период 1986–2012 гг. Следует отметить, что данная оценка среднегодового смыва почвы и, соответственно, суммарных потерь почвы, априори является завышенной, поскольку в своей основе содержит результаты расчетов по универсальному уравнению эрозии (USLE), не учитывающему внутрисклоновую аккумуляцию. На долю последней приходится 20–30%, а в отдельных случаях и до 50% от общего объема материала, вовлеченного в перенос склоновыми потоками (Голосов и др., 2022). Исходя из значений коэффициента доставки наносов (КДН) для склонов различной морфологии, полученных на основе обобщения ряда наблюдений (Голосов и др., 1992) и морфометрического анализа рельефа бассейна р. Плавы (Иванов и др., 2017), была оценена доля наносов, поступивших в долинную сеть, которая составила 61.6%. Таким образом, на склонах было переотложено 38.4% от всех мобилизованных наносов, что составило 6.1×10^6 т.

С использованием имеющихся крупномасштабных карт радиоактивного загрязнения и результатов полевой оценки содержания ^{137}Cs на разных элементах рельефа междуречий (Шамшурин и др., 2016) для водосбора верховий р. Локны (левобережный приток р. Плавы) были рассчитаны абсолютные потери запасов ^{137}Cs на обрабатываемых склонах. Всего за 26 лет после аварии на обрабатываемых склонах бассейна произошло перемещение порядка 12.2×10^{12} Бк запасов ^{137}Cs (в пересчете на 1986 г. с учетом радиоактивного

распада). Таким образом, даже с учетом завышенных оценок темпов смыва, среднегодовые потери запасов на склонах составили не более 0.2%.

4.2. Перераспределение наносов и связанного с ними ^{137}Cs по долинной сети. Днища сухих долин (балок), на долю которых приходится основная протяженность долинной сети бассейна р. Плавы, являются основными участками переотложения наносов, транспортируемых временными потоками с распахиваемых склонов. При этом интенсивность переотложения зависит, главным образом, от уклона днища, а также от наличия или отсутствия донного вреза (Goloso et al., 2000). Согласно оценке, произведенной для бассейна р. Плавы за период 1986–2009 гг., около 60% наносов, смытых с обрабатываемых склонов, не покидает пределы водосборов 1–3-го Хортон-порядка (Belyaev et al., 2012). Доля наносов, выносимых за пределы водосборов долин 4 Хортон-порядка, как правило, не превышает 10% от общего объема смытых с пашни наносов (Фридман и др., 1997; Голосов, 2006; Goloso, 2006). КДН в системе склон – речная долина для всего бассейна р. Плавы в среднем составляет 0.27, исключая сегменты водосбора, отсеченные плотинами искусственных водоемов. Основным источником поступления материала в днища речных долин бассейна р. Плавы являются водосборы непосредственно впадающих в них малых долин 1–2 порядка. Днища сухих долин водосборов более высоких порядков выступают в роли накопителя наносов (Иванов и др., 2017; Gusarov et al., 2019).

Рост суммарных запасов ^{137}Cs на таких аккумулятивных позициях оказывается столь значителен, что способен компенсировать потери от радиоактивного распада, хотя при этом слой с высоким содержанием ^{137}Cs перекрываются наносами с все более и более низкими концентрациями загрязнителя, поступающими с пашни (Иванов и др., 2016; Мамахин и др., 2016; Belyaev et al., 2013a). Суммарная аккумуляция в сухих долинах бассейна р. Плавы за пост-чернобыльский период составила 4.3×10^6 – 6.1×10^6 т (26.9–38.1% от общего объема смытых наносов) (Иванов, 2017).

Исследования пойменных комплексов р. Локны и Плавы показали высокую пространственную неоднородность накопления наносов и радионуклидов. Наблюдается четкое различие между темпами аккумуляции на различных уровнях поймы р. Локны. На низкой пойме, где темпы аккумуляции составили 0.3–1.1 см/год, за счет накопления загрязненных наносов суммарные запасы ^{137}Cs даже с учетом потерь от радиоактивного распада не уменьшились. На средней пойме аккумуляция за пост-чернобыльский период очень низкая в силу сокращения талого стока со склонов, и, как следствие, снижения случаев затопления этого уровня поймы в периоды форми-

рования весеннего половодья (Мамахин и др., 2016). Интенсивное накопление все менее загрязненного материала на низкой пойме р. Локны приводит к снижению мощности формируемой дозы и позитивным радиоэкологическим эффектам (Иванов и др., 2021). Схожая картина наблюдается также и на пойме р. Плавы, где наиболее активно трансформация исходного поля загрязнения происходит на уровне низкой поймы (Иванова и др., 2014). Средние темпы аккумуляции здесь несколько выше и составляют 0.7–1.4 см/год (Belyaev et al., 2013a).

4.3. Оценка суммарных поступлений ^{137}Cs с поверхности водосбора в постоянные водотоки бассейна р. Плавы. Общее поступление наносов в речные долины бассейна р. Плавы за пост-чернобыльский период составило 3.8×10^6 – 5.6×10^6 т (23.5–34.7%), из которых 1.6×10^6 – 1.7×10^6 т (10–11%) аккумуляровалось на поймах рек, а сток наносов по остаточному принципу может быть оценен в диапазоне значений 2.1×10^6 – 4×10^6 т (13.1–24.7%). Для формирования такого стока наносов за время после аварии на Чернобыльской АЭС одного квадратного километра бассейна р. Плавы в среднем в год должно было быть снесено порядка 26.9–64.1 т. Данные значения вполне согласуются с оценкой, произведенной для дочернебыльского периода для рек лесостепной зоны с сопоставимыми размерами речных бассейнов и уровнем сельскохозяйственной нагрузки: Осетр – 17 т/км²/год; Проня – 21 т/км²/год; Ломовка – 40 т/км²/год; Выша – 43 т/км²/год; Зуша – 53 т/км²/год; Атмисс – 63 т/км²/год (Голосов, 1989). Учитывая существенное снижение поверхностного стока воды и наносов в период снеготаяния, начиная с 1990-х гг., полученные значения стока наносов представляются завышенными по сравнению с фактическими.

Суммарные выпадения ^{137}Cs в 1986 г. составили 287.9×10^{12} Бк. Согласно оценкам, представленным в табл. 3, и учитывая завышение расчетных величин смыва почв с пашни, можно утверждать, что суммарный вынос радионуклидов в составе наносов из бассейна р. Плавы в приемный водоток р. Упу не превысил 0.8% от его исходных выпадений в апреле-мае 1986 г.

Масштабы перемещения радионуклидов в составе стока наносов могут быть также оценены согласно уравнению 2 в виде произведения массы стока и средней удельной активности радионуклидов. Ввиду отсутствия регулярных наблюдений за концентрацией ^{137}Cs за период после аварии были использованы значения, полученные в образцах, отобранных на низкой пойме рек Плавы и Локны (Иванова и др., 2014; Belyaev et al. 2013a). Было установлено, что при средней удельной ак-

Таблица 3. Распределение запасов ^{137}Cs между различными составляющими баланса наносов бассейна р. Плавы за период 1986–2012 гг.**Table 3.** Distribution of ^{137}Cs deposits between different parts of the sediment budget of the Plava River basin over 1986–2012

Составляющая баланса наносов	Запасы ^{137}Cs , 10^{12} Бк*	Доля от мобилизованных процессами эрозии запасов, %
Смыв с обрабатываемых склонов	12.2	100
Внутрисклоновая аккумуляция	4.7	31.4
Вынос в долинную сеть	7.5	68.6
Аккумуляция в днищах сухих долин	2.9–4.2	26.9–38.1
Поступление в днища речных долин	3.3–4.6	18.8–30
Пойменная аккумуляция	2.3–3.7	10–11
Вынос за пределы бассейна р. Плавы со стоком наносов	1–2.3	8.1–19.4

Примечание. * – в перерасчете на 1986 г.

тивности 868 Бк/кг в составе стока наносов было вынесено 1.13×10^{12} – 2.69×10^{12} Бк ^{137}Cs . Это составляет 0.45–0.93% от исходных чернобыльских выпадений на территории бассейна. Можно заключить, что оценки, полученные двумя методами, в целом сопоставимы.

В обоих вариантах расчетов доля ^{137}Cs , вынесенного за пределы исследованных речных бассейнов, от общих запасов в результате чернобыльских выпадений, не превышала 1%. Столь низкая величина является вполне ожидаемой с учетом современных темпов эрозионных процессов на пашне и особенностей перераспределения наносов и переносимого совместно с ними ^{137}Cs по пути их транспортировки с пахотных склонов в постоянные водотоки, а также в связи с сокращением площадей пашни после 1991 г. Подобная ситуация прогнозировалась в середине 1990-х гг. (Литвин и др., 1996).

5. ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Перспективы дальнейших балансовых исследований с использованием в качестве трассера чернобыльского ^{137}Cs связаны с двумя обстоятельствами: растущей и совершенствующейся методической базой и интенсивной трансформацией флювиальных систем, обусловленной крупными климатическими изменениями или прямым вмешательством человека.

Хорошие результаты дают оценки перераспределения наносов на обрабатываемых склонах путем комбинирования радиоцезиевого метода с различными моделями эрозии (Goloso et al., 2013). Точность последних может быть существенно улучшена путем использования материалов дистанционного зондирования, включая получаемые самими исследователями с помощью

БПЛА, и анализа метеорологических данных, в особенности для единичных экстремальных эрозионных событий.

Классический метод отбора послойных проб с последующей транспортировкой и лабораторной обработкой образцов требует значительного времени и делает процесс получения итоговых результатов весьма продолжительным. По опыту работ в бассейне р. Плавы между сбором первичной информации и публикацией конечных результатов проходит несколько лет. В районах с высоким уровнем радиоактивного загрязнения быстрое определение содержания радионуклидов в почве *in situ* при помощи полевой спектрометрии позволяет оперативно корректировать расположение точек отбора проб в процессе полевых исследований. Определение относительного распределения запасов ^{137}Cs по почвенному профилю в конкретной точке и выделение “чернобыльского пика” дают возможность предварительной полевой оценки мощности слоя осадконакопления за пост-чернобыльский период. По опыту работ, проведенных на пойме р. Локны (Иванов и др., 2021), полевая спектрометрия значительно ускоряет процесс получения данных по сравнению с лабораторными исследованиями. Полный отказ от послойного отбора не представляется возможным в силу двух причин. Во-первых, остается необходимым определение абсолютных запасов ^{137}Cs в почве, что достижимо только при отборе образцов с фиксированной геометрией. Во-вторых, точность определения вертикального распределения ^{137}Cs при послойном пробоотборе также существенно выше. Таким образом, измерения *in situ* могут только дополнять имеющиеся методы, обеспечивая возможность оперативного получения дополнительных точек измерений с достаточно достоверно выделенной глубиной залегания “чернобыльского пика”, а также давать

обоснование для экстраполяции данных, полученных лабораторным путем.

В условиях роста антропогенной нагрузки принципиально важной является оценка эффективности почвозащитных мер (GolosoV et al., 2008; Belyaev et al., 2009), а также продолжение детальных исследований латеральной миграции ^{137}Cs , поскольку ее можно рассматривать как аналог перераспределения других поллютантов, переносимых совместно с наносами (GolosoV, 2002). По-прежнему остается количественно плохо изученным процесс транспорта и переотложения поступающих с распаханых склонов наносов в пределах границы пашни-задернованный борт долины.

Также перспективным является проведение исследований на водосборах искусственных водоемов, где баланс наносов может быть инструментально оценен, поскольку практически весь поступающий сток наносов задерживается в устьевом створе таких водосборов (Голосов и др., 2021; Belyaev et al., 2013b; Gusarov et al., 2019). Привлечение методов оценки интенсивности эрозионно-аккумулятивных процессов различного временного разрешения позволит проводить оценку балансов наносов для временных отрезков, выходящих за пределы пост-чернобыльского периода (GolosoV et al., 2008).

Исследование осадконакопления в водоемах имеет, в числе прочего, и важное экологическое значение, поскольку водоемы служат накопителями связанных с наносами загрязнителей, которые могут одномоментно поступить в речную систему в случаях спуска водохранилища или разрушения плотины. Кроме того, донные отложения являются своего рода природным архивом, и их изучение позволяет отчасти компенсировать недостаток стационарных наблюдений перераспределения наносов и миграции переносимых совместно с ними загрязнителей в бассейнах малых рек (Иванов и др., 2019; Konoplev et al., 2019; Ivanov et al., 2021). Однако это несколько не уменьшает актуальность мониторинговых исследований в типичных бассейнах малых рек, подвергшихся интенсивному радиоактивному загрязнению, где изменения в интенсивности пойменного осадконакопления могут продемонстрировать влияние климатических флуктуаций и изменений в системе землепользования на функционирование речных бассейнов, как целостных геоморфологических систем.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цикл исследований, выполненных в бассейне р. Плавы, показал, что в целом латеральная миграция радионуклидов в составе стока наносов привела к незначительным изменениям про-

странственной картины загрязнения. Сокращение запасов ^{137}Cs на обрабатываемых склонах междуречий под действием процессов смыва на обрабатываемых склонах за более чем четверть столетия не превысило первых процентов и оказалось в десятки раз ниже, чем потери от естественного радиоактивного распада. Из общего объема мобилизованного материала порядка трети так и не покинуло обрабатываемые склоны, отложившись преимущественно в их средней и нижних частях. Вторая треть была аккумулярована в суходольной сети, где в силу концентрации стока на сравнительно компактных площадях произошел локальный, но существенный рост запасов радионуклидов.

Оставшаяся треть, поступившая в днища долин постоянных водотоков, почти поровну распределилась между пойменной аккумуляцией и стоком наносов, прошедшим через устьевой створ. Формирование бассейновой составляющей стока наносов рек происходит преимущественно за счет звеньев флювиальной сети, непосредственно примыкающих к речным долинам. Наблюдается вполне типичная для бассейнов равнинных рек с высокой антропогенной нагрузкой ситуация, когда только малая доля от общего смыва в конечном итоге переходит в сток наносов. Этому в бассейне р. Плавы способствуют уменьшение талого смыва и относительная стабильность площади пашни, а также широкая практика создания искусственных водоемов, улавливающих наносы.

В условиях снижения уровней и продолжительности весенних половодий аккумуляция наносов, поступивших в днища речных долин с поверхности водосбора, происходит на различных уровнях пойменно-террасового комплекса, непосредственно примыкающих к бортам долины (переотлагается материал, поступающий со склоновым стоком). В постоянных водотоках в основном осуществляется транзит наносов с незначительной (по объему) аккумуляцией материала на поверхности низкой поймы.

Потери запасов ^{137}Cs на пахотных склонах, обусловленные современными темпами смыва, составляют около 5% (менее 0.2% ежегодно). Исходя из того, что доля стока наносов не превышает четверти от исходного количества эродированного материала, можно заключить, что за пределы бассейна р. Плавы было внесено только около 1% запасов ^{137}Cs , сформированных после аварии на ЧАЭС на обрабатываемых склонах. Сходная картина выявлена и для верховий бассейна р. Упы, также затронутого сильным загрязнением после аварии на ЧАЭС (Голосов и др., 2021). Однако даже такие сравнительно малые количества загрязнителей представляют потенциальную угрозу при их концентрации в чашах водоемов, откуда могут

происходить вторичные выбросы радионуклидов в речные системы в случае прорыва плотин.

БЛАГОДАРНОСТИ

Анализ существующих публикаций и результатов исследований в бассейне р. Плавы производился в рамках реализации работ по проекту РНФ № 21-77-00050. Уточнение оценки стока наносов и ¹³⁷Cs производилось в рамках Государственного задания Научно-исследовательской лаборатории Эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева Географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова № 121051100166-4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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 // Почвоведение. 2018. № 1. С. 62–69. <https://doi.org/10.7868/S0032180X18010069>
- Бойко Ф.Ф., Бутаков Г.П., Курбанова С.Г.* Изменения речной сети Татарстана в XVIII–XX веках // Рациональное Использование Водных Ресурсов Республики Татарстан. Казань: Изд. Казанск. ун-та, 1993. С. 22–23.
- Геннадиев А.Н., Голосов В.Н., Чернянский С.С., Маркелов М.В., Олсон К.Р., Ковач Р.Г., Беляев В.Р.* Анализ сопряженного использования радиоактивного и магнитного трассеров для количественной оценки эрозии почв // Почвоведение. 2005. № 9. С. 1080–1093.
- Геннадиев А.Н., Жидкин А.П., Олсон К.Р., Качинский В.Л.* Эрозия почв в различных условиях землепользования: оценка методом магнитного трассера // Почвоведение. 2010. № 9. С. 1126–1134.
- Геннадиев А.Н., Кошовский Т.С., Жидкин А.П., Ковач Р.Г.* Латеральная миграция твердофазного вещества почв в пределах ландшафтно-геохимической арены (метод магнитного трассера) // Почвоведение. 2013. № 10. С. 1–12.
- Голосов В.Н.* Влияние антропогенных факторов на сток взвешенных наносов в бассейне р. Оки // География и природные ресурсы. 1989. № 3. С. 46–50.
- Голосов В.Н.* Эрозионно-аккумулятивные процессы в речных бассейнах освоенных равнин. М: ГЕОС, 2006. 296 с.
- Голосов В.Н.* Эрозионно-аккумулятивные процессы и баланс наносов в бассейне р. Протвы // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 1988. № 3. С. 19–25.
- Голосов В.Н., Геннадиев А.Н., Олсон К.Р., Маркелов М.В., Жидкин А.П., Чендев Ю.Г., Ковач Р.Г.* Пространственно-временные особенности развития почвенно-эрозионных процессов в лесостепной зоне Восточно-Европейской равнины // Почвоведение. 2011. № 7. С. 861–869.
- Голосов В.Н., Жидкин А.П., Петелько А.И., Оситова М.С., Иванова Н.Н., Иванов М.М.* Полевая верификация эрозионных моделей на основе исследований мало-
- го водосбора в бассейне р. Воробжи (Курская область) // Почвоведение. 2022. № 10. С. 1321–1338. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22100045>
- Голосов В.Н., Иванов М.М., Цыпленков А.С., Иванов М.А., Вакияма Ю., Коноплев А.В., Константинов Е.А., Иванова Н.Н.* Эрозия как фактор трансформации радиоактивного загрязнения почв на водосборе Щекинского водохранилища (Тульская область) // Почвоведение. 2021. № 2. С. 247–260. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21020064>
- Голосов В.Н., Иванова Н.Н.* Внутрибассейновое распределение наносов на речном водосборе: методика и проблемы изучения // Эрозия почв и русловые процессы. 2000. Т. 12. С. 215–229.
- 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.
- Голосов В.Н., Куксина Л.В., Иванов М.М., Фролова Н.Л., Иванова Н.Н., Беляев В.Р.* Оценка перераспределения ¹³⁷Cs в пойменных отложениях реки Упы (Тульская область) после аварии на Чернобыльской АЭС // Известия РАН. Серия географическая. 2020. № 1. С. 67–79. <https://doi.org/10.31857/S2587556620010082>
- Докучаев В.В.* Наши степи прежде и теперь. СПб: Типография Е. Евдокимова, 1892. 128 с.
- Иванов М.М.* Эрозионно-аккумулятивные процессы как фактор трансформации поля радиоактивного загрязнения бассейна р. Плавы. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2017. 24 с.
- Иванов М.М., Голосов В.Н., Беляев В.Р.* Анализ строения рельефа для оценки коэффициента доставки наносов бассейна реки Плавы (Тульская область) // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2017. № 3. С. 14–23.
- Иванов М.М., Гуринов А.Л., Иванова Н.Н., Коноплев А.В., Константинов Е.А., Кузьменкова Н.В., Терская Е.В., Голосов В.Н.* Динамика накопления ¹³⁷Cs в донных осадках Щекинского водохранилища за постчернобыльский период // Радиационная биология. Радиоэкология. 2019. Т. 59. № 6. С. 651–663. <https://doi.org/10.1134/S0869803119060055>
- Иванов М.М., Иванова Н.Н., Голосов В.Н., Шамшурина Е.Н.* Оценка накопления сорбированного изотопа ¹³⁷Cs в верхних звеньях флювиальной сети в зоне чернобыльского загрязнения // География и природные ресурсы. 2016. № 4. С. 156–163. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-4\(156-163\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-4(156-163))
- Иванов М.М., Комиссарова О.Л., Кошовский Т.С., Цыпленков А.С.* Применение полевой гамма-спектрометрии и дозиметрии для исследования осадконакопления на пойме малой равнинной реки в зоне радиоактивного загрязнения // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2021. № 1. С. 120–127.
- Иванова Н.Н., Шамшурина Е.Н., Голосов В.Н., Беляев В.Р., Маркелов М.В., Парамонова Т.А., Эврар О.* Оценка перераспределения ¹³⁷Cs экзогенными процессами в днище долины р. Плава (Тульская область) после аварии на Чернобыльской АЭС // Вестник Мос-

- ковского университета. Серия 5. География. 2014. № 1. С. 24–34.
- Ковальчук И.П., Штойко П.И. Изменения речных систем Западного Подолья в XVIII–XX вв. // Геоморфология. 1992. № 2. С. 55–73.
- Ларионов Г.А. Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки. М.: Изд-во МГУ, 1993. 198 с.
- Литвин Л.Ф. География эрозии почв сельскохозяйственных земель России. М.: Академкнига, 2002. 255 с.
- Литвин, Л.Ф., Голосов В.Н., Добровольская Н.Г., Иванова Н.Н., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф. Перераспределение ¹³⁷Cs процессами водной эрозии почв // Водные ресурсы. 1996. № 3. С. 314–320.
- Мамихин С.В., Голосов В.Н., Парамонова Т.А., Шамишурин Е.Н., Иванов М.М. Вертикальное распределение ¹³⁷Cs в аллювиальных почвах поймы р. Локна (Тульская область) в отдаленной после аварии на ЧАЭС и его моделирование // Почвоведение. 2016. № 12. С. 1521–1533.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X16120108>
- Пространственно-временные закономерности развития современных процессов природно-антропогенной эрозии на Русской равнине / В. Н. Голосов, О. П. Ермолаев. Казань: Изд-во АН РТ, 2019. 372 с.
- Прыткова М.Ю. Осадконакопление в малых водохранилищах. Балансовые исследования. Л.: Наука, 1981. 152 с.
- Ратников А.И. Геоморфологические и агропочвенные районы Тульской области // Почвенное районирование СССР. Т. 1. М.: Изд-во МГУ, 1960. С. 92–116.
- 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.
- Чернов А.В. Современное развитие малых рек центральных районов Европейской части СССР / Малые реки центра Русской равнины, их использование и охрана. М.: МФ ГО СССР, 1988. С. 15–24.
- Шамишурин Е.Н., Голосов В.Н., Иванов М.М. Пространственно-временная реконструкция поля выпадения чернобыльского ¹³⁷Cs на почвенный покров в верховьях бассейна реки Локны // Радиационная биология. Радиоэкология. 2016. № 4. С. 414–425.
<https://doi.org/10.7868/S0869803116040123>
- Belyaev V.R., Golosov V.N., Kuznetsova J.S., and Markelov M.V. Quantitative assessment of effectiveness of soil conservation measures using a combination of ¹³⁷Cs radioactive tracer and conventional techniques // Catena. 2009. Vol. 79. Iss. 3. P. 214–227.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2009.05.006>
- Belyaev V.R., Golosov V.N., Markelov M.V., Evrard O., Ivanova N.N., Paramonova T.A., and Shamshurina E.N. Using Chernobyl-derived ¹³⁷Cs to document recent sediment deposition rates on the River Plava floodplain // Hydrological Processes. 2013a. Vol. 27. No. 6. P. 807–821.
<https://doi.org/10.1002/hyp.9461>
- Belyaev V.R., Golosov V.N., Markelov M.V., Ivanova N.N., Shamshurina E.N., and Evrard O. Effects of landuse and climate changes on small reservoir siltation in the agricultural belt of European Russia. Considering hydrological change in reservoir planning and management, proceeding of H09, IAHS-IAPSO-IASPEI assembly, Gothenburg. Sweden, Jul 2013. 2013b. P. 134–145.
- 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., and Bonté P. Quantification of river basin sediment budget based on reconstruction of the post-Chernobyl particle-bound ¹³⁷Cs redistribution // Erosion and sediment yields in the changing environment (proceedings of a symposium held in Chengdu, China, Oct, 2012), IAHS Publ. 356. IAHS Press, Wallingford. 2012. P. 394–403.
- Bobrovitskaya N.N. Erosion and sediment yield modelling in the former USSR // Modelling erosion, sediment transport and sediment yield. International Hydrological Programme. IHP-VI. Tech. Docs in Hydrology. 2002. No. 60. P. 31–45.
- Byrne P., Wood P.J., and Reid I. The impairment of river systems by metal mine contamination: a review including remediation options // Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 2012. Vol. 42. Iss. 19. P. 2017–2077.
<https://doi.org/10.1080/10643389.2011.574103>
- Cerdan O., Le Bissonnais Y., Couturier A., and Saby N. Modelling interrill erosion in small cultivated catchments // Hydrological Processes. 2002. Vol. 16. Iss. 16. P. 3215–3226.
<https://doi.org/10.1002/hyp.1098>
- De Moor J.J.W. and Verstraeten G. Alluvial and colluvial sediment storage in the Geul River catchment (The Netherlands) – combining field and modelling data to construct a Late Holocene sediment budget // Geomorphology. 2008. Vol. 95. Iss. 3–4. P. 487–503.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.07.012>
- Dietrich W.E. and Dunne T. Sediment budget for a small catchment in mountainous terrain // Zeits. Geomorphol. Supp. 1978. Vol. 29. P. 191–206.
[https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029)
- Evrard O., Cerdan O., Chauvet M., Le Bissonnais Y., van Wesemael B., Raclot D., Vandaele K., Andrieux P., and Bielders C.L. Reliability of an expert-based runoff and erosion model: application of STREAM to different environments // Catena. 2009. Vol. 78. Iss. 2. P. 129–141.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2009.03.009>
- Evrard O., Nord G., Cerdan O., Souchère V., Le Bissonnais Y., and Bonté P. Modelling the impact of land use change and rainfall erosivity on sediment export from an agricultural catchment of the northwestern European loess belt. Agriculture // Ecosystems & Environment. 2010. Vol. 138. No. 1–2. P. 83–94.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.04.003>
- Golosov V. Influence of different factors on the sediment yield of the Oka basin rivers (central Russia) // IAHS PUBLICATION. 2006. Vol. 306. P. 28–36.
<https://doi.org/10.13140/2.1.2938.1446>
- Golosov V.N. Special considerations for areas affected by Chernobyl fallout // Handbook for the Assessment of

- Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides. Kluwer Academic Publishers Dordrecht, 2002. P. 165–183.
- Golosov V., Belyaev V., Kuznetsova Y., Markelov M., and Shamshurina E.* Response of a small arable catchment sediment budget to introduction of soil conservation measures // *Sediment Dynamics in Changing Environments*, IAHS Publ. Vol. 325, IAHS Press: Wallingford, UK. 2008. P. 106–113.
- Golosov V.N., Belyaev V.R., and Markelov M.V.* Application of Chernobyl-derived ¹³⁷Cs fallout for sediment redistribution studies: lessons from European Russia // *Hydrological processes*. 2013. Vol. 27. Iss. 6. P. 781–794. <https://doi.org/10.1002/hyp.9470>
- Golosov V.N. and Ivanova N.N.* Some reasons of river net disappearance in conditions of intensive agriculture // *Water Resources*. 1993. Vol. 20. № 6. P. 684–689.
- Golosov V. and Ivanov M.* Chapter 4: Quantitative assessment of lateral migration of the Chernobyl-derived ¹³⁷Cs in contaminated territories of the east European Plain // *Behavior of Radionuclides in the Environment II Chernobyl*, Singapore, 2020. P. 195–226. https://doi.org/10.1007/978-981-15-3568-0_4
- Golosov V., Ivanova N., and Kurbanova S.* Influence of agricultural development and climate changes on the drainage valley density of the southern half of the Russian Plain // *International Journal of Sediment Research*. 2017. Vol. 32. Iss. 1. P. 60–72. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2016.11.002>
- Golosov V., Koiter A., Ivanov M., Maltsev K., Gusarov A., Sharifullin A., and Radchenko, I.* Assessment of soil erosion rate trends in two agricultural regions of European Russia for the last 60 years // *Journal of Soils and Sediments*. 2018a. Vol. 18. No. 12. P. 3388–3403. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2032-1>
- Golosov V. and Panin A.* Century-scale stream network dynamics in the Russian Plain in response to climate and land use change // *Catena*. 2006. Vol. 66. Iss. 1–2. P. 74–92. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.07.011>
- Golosov V.N., Panin A.V., and Markelov M.V.* Chernobyl ¹³⁷Cs redistribution in the small basin of the Lokna river, Central Russia // *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*. 1999b. Vol. 24. Iss. 10. P. 881–885. [https://doi.org/10.1016/S1464-1895\(99\)00130-1](https://doi.org/10.1016/S1464-1895(99)00130-1)
- Golosov V.N., Panin A.V., and Walling D.E.* Post-fallout redistribution of Chernobyl-derived Cs-137 in small catchments within the Lokna river basin // *The role of erosion and sediment transport in nutrient and contaminant transfer*. Canada, Waterloo, July. 2000. P. 10–14.
- Golosov V.N., Walling D.E., Konoplev A.V., Ivanov M.M., and 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 // *Journal of environmental radioactivity*. 2018c. Vol. 186. P. 78–89. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.06.022>
- Golosov V.N., Walling D.E., Panin A.V., Stukin E.D., Kvasnikova E.V., and Ivanova N.N.* The spatial variability of Chernobyl-derived ¹³⁷Cs inventories in a small agricultural drainage basin in central Russia // *Applied Radiation and Isotopes*. 1999a. Vol. 51. Iss. 3. P. 341–352. [https://doi.org/10.1016/S0969-8043\(99\)00050-0](https://doi.org/10.1016/S0969-8043(99)00050-0)
- Golosov V., Yermolaev O., Litvin L., Chizhikova N., Kiryukhina Z., and Safina G.* Influence of climate and land use changes on recent trends of soil erosion rates within the Russian Plain // *Land Degradation & Development*. 2018b. Vol. 29. Iss. 8. P. 2658–2667. <https://doi.org/10.1002/ldr.3061>
- Govers G., Vandaele K., Desmet P., Poesen J., and Bunte K.* The role of tillage in soil redistribution on hillslopes // *European Journal of Soil Science*. 1994. Vol. 45. P. 469–478. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1994.tb00532.x>
- Gusarov A.V.* The impact of contemporary changes in climate and land use/cover on tendencies in water flow, suspended sediment yield and erosion intensity in the northeastern part of the Don River basin, SW European Russia // *Environmental research*. 2019. Vol. 175. P. 468–488. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.03.057>
- Gusarov A.V., Golosov V.N., Ivanov M.M., and Sharifullin A.G.* Influence of relief characteristics and landscape connectivity on sediment redistribution in small agricultural catchments in the forest-steppe landscape zone of the Russian Plain within European Russia // *Geomorphology*. 2019. Vol. 327. P. 230–247. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.11.004>
- Gusarov A.V., Golosov V.N., and Sharifullin A.G.* Contribution of climate and land cover changes to reduction in soil erosion rates within small cultivated catchments in the eastern part of the Russian Plain during the last 60 years // *Environmental research*. 2018. Vol. 167. P. 21–33. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.06.046>
- Hartvigsen M.* Land reform and land fragmentation in central and Eastern Europe // *Land Use Policy*. 2014. Vol. 36. P. 330–341. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2013.08.016>
- Hinderer M.* From gullies to mountain belts: a review of sediment budgets at various scales // *Sedimentary Geology*. 2012. Vol. 280. P. 21–59. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2012.03.009>
- Horowitz A.J.* A Primer on Sediment-Trace Element Chemistry. Lewis, Michigan, 1991. 134 p.
- 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., and Golosov V.N.* Using reservoir sediment deposits to determine the longer-term fate of Chernobyl-derived ¹³⁷Cs fallout in the fluvial system // *Environmental Pollution*. 2021. Vol. 274. 116588. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116588>
- Izrael Yu.A., De Cort M., Jones A.R., Nazarov I.M., Fridman Sh.D., Kvasnikova E. V., Stukin E.D., Kelly G.N., Matveenko I.I., Pokumeiko Yu.M., Tabatchnyi L.Ya., and Tsaturov Yu.Yu.* The atlas of cesium-137 contamination of Europe after the Chernobyl accident. Minsk (Belarus), 1996. 1192 p.
- Jones R.L. and Olson K.R.* Fly ash use as a time marker in sedimentation studies // *Soil Science Society of America Journal*. 1990. Vol. 54. Iss. 3. P. 855–859. <https://doi.org/10.2136/sssaj1990.03615995005400030040x>

- Kondolf G.M., Schmitt R.J., Carling P., Darby S., Arias M., Bizzi S., Castelletti A., Cochran T.A., Gibson S., Kumu M., Oeurng C., Rubin Z., and Wild T.* Changing sediment budget of the Mekong: Cumulative threats and management strategies for a large river basin // *Science of the total environment*. 2018. Vol. 625. P. 114–134. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.361>
- Konoplev A.V., Ivanov M.M., Golosov V.N., and Konstantinov E.A.* Reconstruction of long-term dynamics of Chernobyl-derived ¹³⁷Cs in the upa river using bottom sediments in the schecking reservoir and semi-empirical modeling // *Proceedings IAHS “Land use and climate change impacts on erosion and sediment transport”*. 2019. Vol. 381. P. 95–99. <https://doi.org/10.5194/piahs-381-95-2019>
- Konoplev A., Golosov V., Laptev G., Nanba K., Onda Y., Takase T., Wakiyama Y., and Yoshimura K.* Behavior of accidentally released radiocesium in soil–water environment: Looking at Fukushima from a Chernobyl perspective // *Journal of environmental radioactivity*. 2016. Vol. 151. P. 568–578. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.06.019>
- Litvin L.F., Zorina Y.F., Sidorchuk A.Y., Chernov A.V., and Golosov V.N.* Erosion and sedimentation on the Russian Plain, part 1: contemporary processes // *Hydrological Processes*. 2003. Vol. 17. Iss. 16. P. 3335–3346. <https://doi.org/10.1002/hyp.1390>
- Macklin M.G., Brewer P.A., Hudson-Edwards K.A., Bird G., Coulthard T.J., Dennis I.A., Lechler P.J., Miller J.R., and Turner J.N.* A geomorphological approach to the management of rivers contaminated by metal mining // *Geomorphology*. 2006. Vol. 79. Iss. 3–4. P. 423–447. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.024>
- Macklin M.G., Hudson-Edwards K.A., and Dawson E.J.* The significance of pollution of historic metal mining in the Pennine orefields on river sediment contaminant fluxes to the North Sea // *Science of Total Environment*. 1997. Vol. 194–195. P. 391–397. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(96\)05378-8](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(96)05378-8)
- Marron D.C.* Floodplain storage of mine tailings in the Belle Fourche River system: a sediment budget approach // *Earth Surface Processes and Landforms*. 1992. Vol. 17. Iss. 7. P. 675–685. <https://doi.org/10.1002/esp.3290170704>
- Miller J.R.* The role of fluvial geomorphic processes in the dispersal of heavy metals from mine sites // *Journal of Geochemical Exploration*. 1997. Vol. 58. Iss. 2–3. P. 101–118. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(96\)00073-8](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(96)00073-8)
- Minella J.P., Walling D.E., and Merten G.H.* Establishing a sediment budget for a small agricultural catchment in southern Brazil, to support the development of effective sediment management strategies // *Journal of Hydrology*. 2014. Vol. 519. P. 2189–2201. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.013>
- Notebaert B., Verstraeten G., Rommens T., Vanmontfort B., Govers G., and Poesen J.* Establishing a Holocene sediment budget for the river Dijle // *Catena*. 2009. Vol. 77. Iss. 2. P. 150–163. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.02.001>
- Nyssen J., Poesen J., Moeyersons J., Haile M., and Deckers J.* Dynamics of soil erosion rates and controlling factors in the Northern Ethiopian Highlands—towards a sediment budget // *Earth surface processes and landforms*. 2008. Vol. 33. Iss. 5. P. 695–711. <https://doi.org/10.1002/esp.1569>
- Oldfield F., Thompson R., and Barber K.E.* Changing atmospheric fallout of magnetic particles recorded in recent ombrotrophic peat sections // *Science*. 1978. Vol. 199. Iss. 4329. P. 679–680. <https://doi.org/10.1126/science.199.4329.679>
- Olson K.R., Gennadiyev A.N., Zhidkin A.P., Markelov M.V., Golosov V.N., and Lang J.M.* Use of magnetic tracer and radio-cesium methods to determine past cropland soil erosion amounts and rates // *Catena*. 2013. Vol. 104. P. 103–110. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.10.015>
- Olson K.R. and Jones R.L.* Use of fly ash as time marker in soil erosion and sedimentation studies. *Sustaining the Global Farm*. 2001. P. 1059–1061.
- Panin A.V., Walling D.E., and 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. Iss. 3–4. P. 185–204. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00043-5](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00043-5)
- Sidorchuk A.* Sediment Budget Change in the Fluvial System at the Central Part of the Russian Plain Due to Human Impact. *Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives: Proceedings of an International Symposium Held at Exeter, UK, from 15 to 19 July 1996*. IAHS. № 236. 1996. P. 445.
- Sidorchuk A.Y. and Golosov V.N.* Erosion and sedimentation on the Russian Plain, II: the history of erosion and sedimentation during the period of intensive agriculture // *Hydrological processes*. 2003. Vol. 17. Iss. 16. P. 3347–3358. <https://doi.org/10.1002/hyp.1391>
- Slaymaker O.* The sediment budget as conceptual framework and management tool. *The interactions between sediments and water*. Springer. Dordrecht, 2003. P. 71–82.
- Trimble S.W.* Decreased rates of alluvial sediment storage in the Coon Creek Basin, Wisconsin, 1975–93 // *Science*. 1999. Vol. 285. Iss. 5431. P. 1244–1246. <https://doi.org/10.1126/science.285.5431.1244>
- Walling D.E.* The sediment delivery problem // *Journal of hydrology*. 1983. Vol. 65. Iss. 1–3. P. 209–237. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(83\)90217-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(83)90217-2)
- Walling D.E.* Using environmental radionuclides as tracers in sediment budget investigations // *IAHS Publication*. 2003. Vol. 283. P. 57–78.
- Walling D.E. and Collins A.L.* The catchment sediment budget as a management tool // *Environmental Science & Policy*. 2008. Vol. 11. Iss.2. P. 136–143. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2007.10.004>
- Walling D.E. and He Q.* Improved models for estimating soil erosion rates from cesium-137 measurements // *American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America*. 1999. Vol. 28. Iss. 2. P. 611–622. <https://doi.org/10.2134/jeq1999.00472425002800020027x>
- Walling D.E., Owens P.N., Carter J., Leeks G.J.L., Lewis S., Meharg A.A., and Wright J.* Storage of sediment-associated nutrients and contaminants in river channel and

- floodplain systems // *Applied geochemistry*. 2003. Vol. 18. Iss. 2. P. 195–220. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00121-X](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00121-X)
- Wang Z. Y., Li Y., and He Y. Sediment budget of the Yangtze River // *Water Resources Research*. 2007. Vol. 43. Iss. 4. W04401. <https://doi.org/10.1029/2006WR005012>
- Zhidkin A. P., Shamshurina E. N., Golosov V. N., Komissarov M. A., Ivanova N. N., and Ivanov M. M. Detailed study of post-Chernobyl Cs-137 redistribution in the soils of a small agricultural catchment (Tula region, Russia) // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020. Vol. 223. 106386. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106386>

THE SEDIMENT BUDGET AND MIGRATION OF ¹³⁷Cs IN CHERNOBYL AFFECTED AREA: 30 YEARS OF INVESTIGATIONS IN THE PLAVA RIVER BASIN, TULA REGION¹

M. M. Ivanov^{a,b,#}, V. N. Golosov^{a,b}, and N. N. Ivanova^a

^aLomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

^bInstitute of Geography RAS, Moscow, Russia

[#]E-mail: ivanovm@bk.ru

The Plava River basin (Tula region) is considered the most polluted with Chernobyl fallout region in Russian Federation. Detailed studies of sediment redistribution and migration of ¹³⁷Cs produced by Chernobyl were conducted in the basin. The article provides an overview of results from various studies conducted during the last 30 years estimating the rate of erosion and sediment redistribution based on different methodology including ¹³⁷Cs. Sediment budgets for different parts of the fluvial network were developed based on estimated rates of erosion and accumulation of sediments within the Plava River basin for the post-Chernobyl period. It has been established that eroded from agricultural fields sediments accumulate on the slopes of interfluvies (38.4%) and in the bottoms of dry valleys (27–38%). Part of the sediment delivered by slope runoff and temporary watercourses from the slopes of the interfluvies to the bottoms of river valleys was redeposited on river floodplains (10–11%), and the remaining part (13.1–24.7%) passed into the river sediment load. The value of basin contribution of sediments to the Plava River sediment runoff is somewhat overestimated due to the specifics of the erosion models used to calculate soil erosion from arable land. It has been established that for the period of more than 25 years since the Chernobyl accident, 5% of ¹³⁷Cs deposits were lost due to soil erosion (less than 0.2% annually). According to evaluated sediment budget, only a quarter of mobilized material leaves basin as a sediment yield. Thus, only about 1% of the initial ¹³⁷Cs fallout was removed from the Plava basin. The perspective directions for research on sediment redistribution in the plain river basins located in the temperate zone using ¹³⁷Cs as a technogenic tracer are outlined.

Keywords: erosion and deposition processes, radiocesium method, ¹³⁷Cs, Chernobyl contamination, fluvial geomorphology

ACKNOWLEDGEMENTS

The analysis of existing publications and research results in the basin of the Plava River was carried out as part of the implementation of the work on the project of the Russian Scientific Foundation No. 21-77-00050. The assessment of sediment and ¹³⁷Cs yield was carried out within the framework of the State Task of the Research Laboratory of Soil Erosion and Channel Processes named after N.I. Makkaev, Faculty of Geography of Lomonosov Moscow State University No. 121051100166-4.

REFERENCES

- Barabanov A. T., Dolgov S. V., Koronkevich N. I., Panov V. I., and 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 science*. 2018. Vol. 51. Iss. 1. P. 66–72. <https://doi.org/10.1134/S1064229318010039>
- Belyaev V. R., Golosov V. N., Kuznetsova J. S., and Markelov M. V. Quantitative assessment of effectiveness of soil conservation measures using a combination of ¹³⁷Cs radioactive tracer and conventional techniques. *Catena*. 2009. Vol. 79. Iss. 3. P. 214–227. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2009.05.006>
- Belyaev V. R., Golosov V. N., Markelov M. V., Evrard O., Ivanova N. N., Paramonova T. A., and Shamshurina E. N. Using Chernobyl-derived ¹³⁷Cs to document recent sediment deposition rates on the River Plava floodplain. *Hydrological Processes*. 2013a. Vol. 27. No. 6. P. 807–821. <https://doi.org/10.1002/hyp.9461>
- Belyaev V. R., Golosov V. N., Markelov M. V., Ivanova N. N., Shamshurina E. N., and Evrard O. Effects of landuse and climate changes on small reservoir siltation in the agricultural belt of European Russia. Considering hy-

¹ For citation: Ivanov M. M., Golosov V. N., and Ivanova N. N. 2023. The sediment budget and migration of ¹³⁷Cs in Chernobyl affected area: 30 years of investigations in the Plava River basin, Tula region. *Geomorfologiya i Paleogeografiya*, vol. 54, no. 1, pp. 55–73 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0435428123010054>; <https://elibrary.ru/GQAUPI>

- drological change in reservoir planning and management, proceeding of H09, IAHS-IAPSO-IASPEI assembly, Gothenburg, Sweden, Jul 2013. 2013b. P. 134–145.
- 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., Otle C., Lefevre I., and Bonte P. Quantification of river basin sediment budget based on reconstruction of the post-Chernobyl particle-bound ¹³⁷Cs redistribution. Erosion and sediment yields in the changing environment (proceedings of a symposium held in Chengdu, China, Oct, 2012), IAHS Publ. 356. IAHS Press, Wallingford. 2012. P. 394–403.
- Bobrovitskaya N.N. Erosion and sediment yield modelling in the former USSR. Modelling erosion, sediment transport and sediment yield. International Hydrological Programme. IHP-VI. Tech. Docs in Hydrology. 2002. No. 60. P. 31–45.
- Boiko F.F., Boutakov G.P., and Kourbanova S.G. Changes in the river network of the Tatarstan in XVIII–XX centuries. *Ratsional'noe ispol'zovanie vodnykh resursov Respubliki Tatarstan*. Kazan': The Kazan' University (Publ.), 1993. P. 22–23. (in Russ.)
- Byrne P., Wood P. J., and Reid I. The impairment of river systems by metal mine contamination: a review including remediation options. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2012. Vol. 42. Iss. 19. P. 2017–2077.
<https://doi.org/10.1080/10643389.2011.574103>
- Cerdan O., Le Bissonnais Y., Couturier A., and Saby N. Modelling interrill erosion in small cultivated catchments. *Hydrological Processes*. 2002. Vol. 16. Iss. 16. P. 3215–3226.
<https://doi.org/10.1002/hyp.1098>
- Chernov A.V. Modern development of a small rivers in the central part of the European Russia. *Malye reki tsentra Russkoi ravniny, ikh ispol'zovanie i okhrana*. M.: MF GO SSSR (Publ.), 1988. P. 15–24. (in Russ.)
- De Moor J.J. W. and Verstraeten G. Alluvial and colluvial sediment storage in the Geul River catchment (The Netherlands) – combining field and modelling data to construct a Late Holocene sediment budget. *Geomorphology*. 2008. Vol. 95. Iss. 3–4. P. 487–503.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.07.012>
- Dietrich W.E., Dunne T. Sediment budget for a small catchment in mountainous terrain. *Zeits. Geomorphol. Supp.* 1978. Vol. 29. P. 191–206.
[https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029)
- Dokuchaev V.V. *Nashi stepi prezhd e i teper'* (Our steppes before and now). SPB: Typography of E. Evdokimov (Publ.), 1892. 128 p. (in Russ.)
- Evrard O., Cerdan O., Chauvet M., Le Bissonnais Y., van Wesemael B., Raclot D., Vandaele K., Andrieux P., and Biolders C.L. Reliability of an expert-based runoff and erosion model: application of STREAM to different environments. *Catena*. 2009. Vol. 78. Iss. 2. P. 129–141.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2009.03.009>
- Evrard O., Nord G., Cerdan O., Souchère V., Le Bissonnais Y., and Bonté P. Modelling the impact of land use change and rainfall erosivity on sediment export from an agricultural catchment of the northwestern European loess belt. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2010. Vol. 138. No. 1–2. P. 83–94.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.04.003>
- Fridman Sh.D., Kvasnikova E.V., Golosov V.N., and Ivanova N.N. Caesium-137 migration in the geographical complexes of the central Russian hills. *Russian Meteorology and Hydrology*. 1997. No. 5. P. 45–55.
- Gennadiyev A.N., Golosov V.N., Chernyanskii S.S., Markelov M.V., Olson K.P., Kovach R.G., and Belyaev V.R. The concurrent use of radioactive and magnetic tracers for soil erosion quantification. *Eurasian Soil Science*. 2005. Vol. 38. Iss. 9. P. 954–965.
- Gennadiyev A.N., Koshovskii T.S., Zhidkin A.P., and Kovach R.G. Lateral migration of soil solid-phase material within a landscape-geochemical arena detected using the magnetic tracer method. *Eurasian soil science*. 2013. Vol. 46. Iss. 10. P. 983–993.
<https://doi.org/10.1134/S1064229313100037>
- Gennadiyev A.N., Zhidkin A.P., Olson K.R., and Kachinskii V.L. Soil erosion under different land uses: Assessment by the magnetic tracer method. *Eurasian Soil Science*. 2010. Vol. 43. Iss. 9. P. 1047–1054.
<https://doi.org/10.1134/S1064229310090127>
- Golosov V., Belyaev V., Kuznetsova Y., Markelov M., and Shamshurina E. Response of a small arable catchment sediment budget to introduction of soil conservation measures. *Sediment Dynamics in Changing Environments*, IAHS Publ. Vol. 325. IAHS Press: Wallingford, UK. 2008. P. 106–113.
- Golosov V.N. Erosion and accumulation processes in the basin of the Protva River. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*. 1988. No. 3. P. 19–25. (in Russ.)
- Golosov V.N. Influence of anthropogenic factors on sediment yield of the rivers of the Oka basin. *Geografiya i prirodnye resursy*. 1989. No. 3. P. 46–50. (in Russ.)
- Golosov V.N. Special considerations for areas affected by chernobyl fallout. *Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides*. Kluwer Academic Publishers Dordrecht. 2002. P. 165–183.
- Golosov V.N. *Erozionno-akkumulyativnye protsessy v rechnykh basseynakh osvoennykh ravnin* (Erosion and deposition processes in the river basins of cultivated plains). M: GEOS (Publ.), 2006. 296 p. (in Russ.)
- Golosov V. Influence of different factors on the sediment yield of the Oka basin rivers (central Russia). *IAHS PUBLICATION*. 2006. Vol. 306. P. 28–36.
<https://doi.org/10.13140/2.1.2938.1446>
- Golosov V.N., Belyaev V.R., and Markelov M.V. Application of Chernobyl-derived ¹³⁷Cs fallout for sediment redistribution studies: lessons from European Russia. *Hydrological processes*. 2013. Vol. 27. Iss. 6. P. 781–794.
<https://doi.org/10.1002/hyp.9470>
- Golosov V.N., Gennadiyev A.N., Olson K.R., Markelov M.V., Zhidkin A.P., Chendev Yu.G., and Kovach R.G. Spatial and temporal features of soil erosion in the forest-steppe zone of the East-European Plain. *Eurasian Soil Science*. 2011. Vol. 44. Iss. 7. P. 794–801.
<https://doi.org/10.1134/S1064229311070064>
- Golosov V. and Ivanov M. Chapter 4: Quantitative assessment of lateral migration of the Chernobyl-derived

- ¹³⁷Cs in contaminated territories of the east European Plain. Behavior of Radionuclides in the Environment II Chernobyl, Singapore, 2020. P. 195–226. https://doi.org/10.1007/978-981-15-3568-0_4
- Golosov V.N., Ivanov M.M., Tsyplenkov A.S., Ivanov M.A., Wakiyama Y., Konoplev A.V., Konstantinov E.A., and Ivanova N.N. Erosion as a Factor of Transformation of Soil Radioactive Contamination in the Basin of the Shchekino Reservoir (Tula Region). *Eurasian Soil Science*. 2021. Vol. 54. Iss. 2. P. 291–303. <https://doi.org/10.1134/S106422932102006X>
- Golosov V.N. and Ivanova N.N. Intrabasin distribution of sediments within river catchment: methods and research issues. *Erozia pochv i ruslovye protsessy*. 2000. Iss. 12. P. 215–229. (in Russ.)
- Golosov V.N. and Ivanova N.N. Some reasons of river net disappearance in conditions of intensive agriculture. *Water Resources*. 1993. Vol. 20. No. 6. P. 684–689.
- Golosov V., Ivanova N., and Kurbanova S. Influence of agricultural development and climate changes on the drainage valley density of the southern half of the Russian Plain. *International Journal of Sediment Research*. 2017. Vol. 32. Iss. 1. P. 60–72. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2016.11.002>
- Golosov V.N., Ivanova N.N., Litvin L.F., and Sidorchuk A. Yu. Sediment budget in river basins and small river aggradation. *Geomorfologiya*. 1992. No. 4. P. 62–71. (in Russ.)
- Golosov V., Koiter A., Ivanov M., Maltsev K., Gusarov A., Sharifullin A., and Radchenko, I. Assessment of soil erosion rate trends in two agricultural regions of European Russia for the last 60 years. *Journal of Soils and Sediments*. 2018a. Vol. 18. No. 12. P. 3388–3403. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2032-1>
- Golosov V.N., Kuksina L.V., Ivanov M.M., Frolova N.L., Ivanova N.N., and Belyaev V.R. Evaluation of ¹³⁷Cs redistribution in the floodplain sediment of the Upa River (Tula oblas) after the Chernobyl accident. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*. 2020. No. 1. P. 114–126. <https://doi.org/10.31857/S2587556620010082>
- Golosov V. and Panin A. Century-scale stream network dynamics in the Russian Plain in response to climate and land use change. *Catena*. 2006. Vol. 66. Iss. 1–2. P. 74–92. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.07.011>
- Golosov V.N., Panin A.V., and Markelov M.V. Chernobyl ¹³⁷Cs redistribution in the small basin of the Lokna river, Central Russia. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*. 1999b. Vol. 24. Iss. 10. P. 881–885. [https://doi.org/10.1016/S1464-1895\(99\)00130-1](https://doi.org/10.1016/S1464-1895(99)00130-1)
- Golosov V.N., Panin A.V., and Walling D.E. Post-fallout redistribution of Chernobyl-derived Cs-137 in small catchments within the Lokna river basin. The role of erosion and sediment transport in nutrient and contaminant transfer. Canada, Waterloo, July. 2000. P. 10–14.
- Golosov V.N., Walling D.E., Konoplev A.V., Ivanov M.M., and 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. *Journal of environmental radioactivity*. 2018c. Vol. 186. P. 78–89. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.06.022>
- Golosov V.N., Walling D.E., Panin A.V., Stukin E.D., Kvasnikova E.V., and Ivanova N.N. The spatial variability of Chernobyl-derived ¹³⁷Cs inventories in a small agricultural drainage basin in central Russia. *Applied Radiation and Isotopes*. 1999a. Vol. 51. Iss. 3. P. 341–352. [https://doi.org/10.1016/S0969-8043\(99\)00050-0](https://doi.org/10.1016/S0969-8043(99)00050-0)
- Golosov V.N. and Yermolayev O.P. (Eds). *Prostranstvenno-vremennye zakonomernosti razvitiya sovremennykh protsessov prirodno-antropogennoi erozii na Russkoi ravnine* (Spatio-temporal patterns of contemporary processes dynamics of natural and human-induced erosion on agricultural lands of the Russian Plain). Kazan: AN RT (Publ.), 2019. 372 p. (in Russ.)
- Golosov V., Yermolaev O., Litvin L., Chizhikova N., Kiryukhina Z., and Safina G. Influence of climate and land use changes on recent trends of soil erosion rates within the Russian Plain. *Land Degradation & Development*. 2018b. Vol. 29. Iss. 8. P. 2658–2667. <https://doi.org/10.1002/ldr.3061>
- Golosov V.N., Zhidkin A.P., Petelko A.I., Osipova M.S., Ivanova N.N., and Ivanov M.M. *Polevaya verifikatsiya erozionnykh modelei na osnove issledovaniia malogo vodoshora v basseine r. Vorobzhi (Kurskaya oblast')* (Field verification of the erosion models based on the exploration of a little catchment in Vorobzha River basin (Kursk Oblast)). *Eurasian Soil Science*. 2022. Iss. 10. P. 1321–1338. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22100045>
- Govers G., Vandaele K., Desmet P., Poesen J., and Bunte K. The role of tillage in soil redistribution on hillslopes. *European Journal of Soil Science*. 1994. Vol. 45. P. 469–478. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1994.tb00532.x>
- Gusarov A.V. The impact of contemporary changes in climate and land use/cover on tendencies in water flow, suspended sediment yield and erosion intensity in the northeastern part of the Don River basin, SW European Russia. *Environmental research*. 2019. Vol. 175. P. 468–488. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.03.057>
- Gusarov A.V., Golosov V.N., Ivanov M.M., and Sharifullin A.G. Influence of relief characteristics and landscape connectivity on sediment redistribution in small agricultural catchments in the forest-steppe landscape zone of the Russian Plain within European Russia. *Geomorphology*. 2019. Vol. 327. P. 230–247. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.11.004>
- Gusarov A.V., Golosov V.N., and Sharifullin A.G. Contribution of climate and land cover changes to reduction in soil erosion rates within small cultivated catchments in the eastern part of the Russian Plain during the last 60 years. *Environmental research*. 2018. Vol. 167. P. 21–33. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.06.046>
- Hartvigsen M. Land reform and land fragmentation in central and Eastern Europe. *Land Use Policy*. 2014. Vol. 36. P. 330–341. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2013.08.016>
- Hinderer M. From gullies to mountain belts: a review of sediment budgets at various scales. *Sedimentary Geology*. 2012. Vol. 280. P. 21–59. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2012.03.009>

- Horowitz A.J. *A Primer on Sediment-Trace Element Chemistry*. Lewis, Michigan, 1991. 134 p.
- Ivanov M.M. *Erozionno-accumulyativnye protsessy kak faktor transformatsii polya radioaktivnogo zagryazneniya basseina r. Plavy* (Erosion and accumulation processes as a factor transformation of radioactive contamination of the Plava River basin) PhD thesis. Moscow: MSU (Publ.), 2017. 24 p. (in Russ.)
- Ivanov M.M., Golosov V.N., and Belyaev V.R. Analysis of topography structure for the evaluation of sediment delivery ratio within Plava River basin (Tula oblast). *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*. 2017. No. 3. P. 14–22. (in Russ.)
- Ivanov M.M., Gurinov A.L., Ivanova N.N., Konoplev A.V., Konstantinov E.A., Kuzmenkova N.V., Terskaya E.V., and Golosov V.N. Dynamics of ^{137}Cs accumulation in the bottom sediments of the Sheckino Reservoir during post-Chernobyl period. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya*. 2019. Vol. 59. No. 6. P. 656–668. (in Russ.)
- Ivanov M.M., Ivanova N.N., Golosov V.N., and Shamshurina E.N. Assessing the accumulation of sorbed isotope ^{137}Cs within the upper components of the fluvial network in the zone of Chernobyl contamination. *Geography and Natural Resources*. 2016. Vol. 37. Iss. 4. P. 355–361.
<https://doi.org/10.1134/S1875372816040107>
- Ivanov M.M., Komissarova O.L., Koshovskyi T.S., and Tsyplenkov A.S. Application of field gamma-spectrometry and dosimetry to study sedimentation on the floodplain of a small plain river in the zone of radioactive contamination. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*. 2021. No. 1. P. 120–127. (in Russ.)
- 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., and Golosov V.N. Using reservoir sediment deposits to determine the longer-term fate of Chernobyl-derived ^{137}Cs fallout in the fluvial system. *Environmental Pollution*. 2021. Vol. 274. 116588. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116588>
- Ivanova N.N., Shamshurina E.N., Golosov V.N., Belyaev V.R., Markelov M.V., Paramonova T.A., and Evrard O. Assessment of ^{137}Cs redistribution by exogenic processes in the Plava River valley bottom (Tula oblast) after the Chernobyl accident. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*. 2014. No. 1. P. 24–34. (in Russ.)
- Izrael Yu.A., De Cort M., Jones A.R., Nazarov I.M., Fridman Sh.D., Kvasnikova E.V., Stukin E.D., Kelly G.N., Matveenko I.I., Pokumeiko Yu.M., Tabatchnyi L.Ya., and Tsaturov Yu.Yu. *The atlas of cesium-137 contamination of Europe after the Chernobyl accident*. Minsk (Belarus), 1996. 1192 p.
- Jones R.L., Olson K.R. Fly ash use as a time marker in sedimentation studies. *Soil Science Society of America Journal*. 1990. Vol. 54. Iss. 3. P. 855–859.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1990.03615995005400030040x>
- Kondolf G.M., Schmitt R.J., Carling P., Darby S., Arias M., Bizzi S., Castelletti A., Cochrane T. A., Gibson S., Kumm M., Oeurng C., Rubin Z., and Wild T. Changing sediment budget of the Mekong: Cumulative threats and management strategies for a large river basin. *Science of the total environment*. 2018. Vol. 625. P. 114–134.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.361>
- Konoplev A., Golosov V., Laptev G., Nanba K., Onda Y., Takase T., Wakiyama Y., and Yoshimura K. Behavior of accidentally released radiocesium in soil–water environment: Looking at Fukushima from a Chernobyl perspective. *Journal of environmental radioactivity*. 2016. Vol. 151. P. 568–578.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.06.019>
- Konoplev A.V., Ivanov M.M., Golosov V.N., and Konstantinov E.A. Reconstruction of long-term dynamics of Chernobyl-derived ^{137}Cs in the upa river using bottom sediments in the sheckino reservoir and semi-empirical modeling. Proceedings IAHS “Land use and climate change impacts on erosion and sediment transport”. 2019. Vol. 381. P. 95–99.
<https://doi.org/10.5194/piahs-381-95-2019>
- Koval'chuk I.P., Shtoiko P.I. Changes in river systems of the Zapadnoy Podolye in XVIII–XX centuries. *Geomorfologiya*. 1992. No. 2. P. 55–73. (in Russ.)
- Larionov G.A. *Eroziya i deflyatsiya pochv: osnovnye zakonomernosti i kolichestvennye otsenki* (Erosion and deflation of soils: basic patterns and assessments). M.: MGU (Publ.), 1993. 198 p. (in Russ.)
- Litvin L.F. *Geografiya erozii pochv sel'skokhozyaystvennykh zemel' Rossii* (Geography of soil erosion on agricultural lands of Russia). M.: Akademkniga (Publ.), 255 p. (in Russ.)
- Litvin L.F., Golosov V.N., Doborvolskaya N.G., Ivanova N.N., Kyrukhina Z.P., and Krasnov S.F. The redistribution of ^{137}Cs by water erosion of soils. *Vodnye resursy*. 1996. No. 3. P. 314–320. (in Russ.)
- Litvin L.F., Zorina Y.F., Sidorchuk A.Y., Chernov A.V., and Golosov V.N. Erosion and sedimentation on the Russian Plain, part 1: contemporary processes. *Hydrological Processes*. 2003. Vol. 17. Iss. 16. P. 3335–3346.
<https://doi.org/10.1002/hyp.1390>
- Macklin M.G., Brewer P.A., Hudson-Edwards K.A., Bird G., Coulthard T.J., Dennis I.A., Lechler P.J., Miller J.R., and Turner J.N. A geomorphological approach to the management of rivers contaminated by metal mining. *Geomorphology*. 2006. Vol. 79. Iss. 3–4. P. 423–447.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.024>
- Macklin M.G., Hudson-Edwards K.A., and Dawson E.J. The significance of pollution of historic metal mining in the Pennine orefields on river sediment contaminant fluxes to the North Sea. *Science of Total Environment*. 1997. Vol. 194–195. P. 391–397.
[https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(96\)05378-8](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(96)05378-8)
- Mamikhin S.V., Golosov V.N., Paramonova T.A., Shamshurina E.N., and 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 Science*. 2016. Vol. 49. Iss. 12. P. 1432–1442.
<https://doi.org/10.1134/S1064229316120103>
- Marron D.C. Floodplain storage of mine tailings in the Belle Fourche River system: a sediment budget approach. *Earth Surface Processes and Landforms*. 1992. Vol. 17. Iss. 7. P. 675–685.
<https://doi.org/10.1002/esp.3290170704>

- Miller J.R. The role of fluvial geomorphic processes in the dispersal of heavy metals from mine sites. *Journal of Geochemical Exploration*. 1997. Vol. 58. Iss. 2–3. P. 101–118.
[https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(96\)00073-8](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(96)00073-8)
- Minella J.P., Walling D.E., and Merten G.H. Establishing a sediment budget for a small agricultural catchment in southern Brazil, to support the development of effective sediment management strategies. *Journal of Hydrology*. 2014. Vol. 519. P. 2189–2201.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.013>
- Notebaert B., Verstraeten G., Rommens T., Vanmontfort B., Govers G., and Poesen J. Establishing a Holocene sediment budget for the river Dijle. *Catena*. 2009. Vol. 77. Iss. 2. P. 150–163.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.02.001>
- Nyssen J., Poesen J., Moeyersons J., Haile M., and Deckers J. Dynamics of soil erosion rates and controlling factors in the Northern Ethiopian Highlands—towards a sediment budget. *Earth surface processes and landforms*. 2008. Vol. 33. Iss. 5. P. 695–711.
<https://doi.org/10.1002/esp.1569>
- Oldfield F., Thompson R., and Barber K.E. Changing atmospheric fallout of magnetic particles recorded in recent ombrotrophic peat sections. *Science*. 1978. Vol. 199. Iss. 4329. P. 679–680.
<https://doi.org/10.1126/science.199.4329.679>
- Olson K.R., Gennadiyev A.N., Zhidkin A.P., Markelov M.V., Golosov V.N., and Lang J.M. Use of magnetic tracer and radio-caesium methods to determine past cropland soil erosion amounts and rates. *Catena*. 2013. Vol. 104. P. 103–110.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.10.015>
- Olson K.R., Jones R.L. Use of fly ash as time marker in soil erosion and sedimentation studies. Sustaining the Global Farm. 2001. P. 1059–1061.
- Panin A.V., Walling D.E., and 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. Iss. 3–4. P. 185–204.
[https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00043-5](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00043-5)
- Prytkova M.Ya. *Osadkonakoplenie v malykh vodokhranilishchakh. Balansovye issledovaniya* (Sedimentation in small reservoirs. Balance studies). L.: Nauka (Publ.), 1981. 152 p. (in Russ.)
- Ratnikov A.I. Geomorphic and agro-pedologic zones of Tula region. *Pochvennoe raionirovanie SSSR*. Iss. 1. M.: MGU (Publ.), 1960. P. 92–116. (in Russ.)
- Shamshurina E.N., Golosov V.N., and Ivanov M.M. Spatial-temporal reconstruction of Chernobyl-derived Cs fallout on the soil cover in the upper reach of the Lokna River. *Radiatsionnaya biologiya. Radioecology*. 2016. No. 4. P. 414–425. (in Russ.)
<https://doi.org/10.7868/S0869803116040123>
- Sidorchuk A. Sediment Budget Change in the Fluvial System at the Central Part of the Russian Plain Due to Human Impact. Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives: Proceedings of an International Symposium Held at Exeter, UK, from 15 to 19 July 1996. IAHS. No. 236. 1996. P. 445.
- Sidorchuk A.Y. and Golosov V.N. Erosion and sedimentation on the Russian Plain, II: the history of erosion and sedimentation during the period of intensive agriculture. *Hydrological processes*. 2003. Vol. 17. Iss. 16. P. 3347–3358.
<https://doi.org/10.1002/hyp.1391>
- Slymaker O. The sediment budget as conceptual framework and management tool. The interactions between sediments and water. Springer. Dordrecht, 2003. P. 71–82.
- Trimble S.W. Decreased rates of alluvial sediment storage in the Coon Creek Basin, Wisconsin, 1975–93. *Science*. 1999. Vol. 285. Iss. 5431. P. 1244–1246.
<https://doi.org/10.1126/science.285.5431.1244>
- Walling D.E. The sediment delivery problem. *Journal of hydrology*. 1983. Vol. 65. Iss. 1–3. P. 209–237.
[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(83\)90217-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(83)90217-2)
- Walling D.E. Using environmental radionuclides as tracers in sediment budget investigations. *IAHS Publication*. 2003. Vol. 283. P. 57–78.
- Walling D.E., Collins A.L. The catchment sediment budget as a management tool. *Environmental Science & Policy*. 2008. Vol. 11. Iss. 2. P. 136–143.
<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2007.10.004>
- Walling D.E., He Q. Improved models for estimating soil erosion rates from cesium-137 measurements. *American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America*. 1999. Vol. 28. Iss. 2. P. 611–622.
<https://doi.org/10.2134/jeq1999.00472425002800020027x>
- Walling D.E., Owens P.N., Carter J., Leeks G.J.L., Lewis S., Meharg A.A., and Wright J. Storage of sediment-associated nutrients and contaminants in river channel and floodplain systems. *Applied geochemistry*. 2003. Vol. 18. Iss. 2. P. 195–220.
[https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00121-X](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00121-X)
- Wang Z.Y., Li Y., and He Y. Sediment budget of the Yangtze River. *Water Resources Research*. 2007. Vol. 43. Iss. 4. W04401.
<https://doi.org/10.1029/2006WR005012>
- Zhidkin A.P., Shamshurina E.N., Golosov V.N., Komissarov M.A., Ivanova N.N., and Ivanov M.M. Detailed study of post-Chernobyl Cs-137 redistribution in the soils of a small agricultural catchment (Tula region, Russia). *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020. Vol. 223. 106386.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106386>