

ТЕМПЫ НАКОПЛЕНИЯ ПРОДУКТОВ ЭРОЗИИ ПОЧВ В ДНИЩЕ БАЛКИ С РАСПАХАННЫМ ВОДОСБОРОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ РАДИОЦЕЗИЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

М.М. Иванов¹, Н.Н. Иванова², П.И. Фоминых³, Н.Н. Луговой⁴

^{1–4} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет,
Научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева*
^{1, 3, 4} *Институт географии РАН*

¹ *Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: ivanovm@bk.ru*

² *Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: nadine_iv@mail.ru*

³ *Инженер-исследователь; e-mail: foma41polina@gmail.com*

⁴ *Ст. науч. сотр.; e-mail: lugovoy-n@ya.ru*

Накопление наносов в верхних звеньях флювиальной сети является одним из главных свидетельств развития ускоренной эрозии на склонах в период сельскохозяйственного использования водосбора. Изучение вертикального распределения техногенного ¹³⁷Cs в районах чернобыльского загрязнения дает возможность оценить интенсивность аккумуляции за период после его выпадения. В работе представлен опыт оценки изменений темпов осадконакопления в днище малой балки с полностью распаханым водосбором на юге Тульской области. Динамика отложения продуктов эрозии почв за периоды 1986–2010 и 1986–2023 гг. была выявлена при помощи проведения повторного послойного отбора образцов почвы в днище и определения глубины залегания чернобыльского пика концентрации ¹³⁷Cs. Было также проведено ручное бурение в днище долины для определения мощности агрогенных осадков, начавших накапливаться с конца XVII в. Результаты исследования показали, что в постчернобыльский этап происходила более интенсивная аккумуляция в сравнении со всем периодом хозяйственного освоения. Процесс осадконакопления характеризуется значительной пространственно-временной неоднородностью. Рост темпов аккумуляции наблюдается в верховьях долины и на участках сужения днища: с 0,4–0,7 до 1,6–3 см в год. В нижней и приустьевой части не отмечено увеличения мощности аккумулятивной толщи, здесь преобладает перемыв и вынос за пределы водосбора отложенного ранее материала. В среднем после Чернобыльской аварии в балке аккумулировалось 39,9–42,3 т наносов ежегодно, что более чем 2 раза превышает средние показатели за весь период хозяйственного освоения – 19,3 т в год. В будущем при сохранении наблюдаемой тенденции будет происходить увеличение уклона днища, что может привести к активизации имеющихся и появлению новых донных врезов. Полученный опыт показал, что повторные радиоцезиевые исследования могут быть важным инструментом для оценки долгосрочных изменений эрозионно-аккумулятивных процессов и баланса наносов в пределах водосборов с высокой антропогенной нагрузкой.

Ключевые слова: сток наносов, ¹³⁷Cs, повторный отбор образцов, чернобыльское загрязнение, Тульская область, Среднерусская возвышенность

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.4.6

ВВЕДЕНИЕ

Вмешательство человека в природную среду при земледельческом освоении территорий приводит к нарушению естественного растительного покрова и развитию ускоренной эрозии на обрабатываемых склонах [Ермолаев, 2002; Лисецкий и др., 2011; Zuazo, Pleguezuelo, 2009]. В результате смыл с поверхности пашни становится доминирующей статьей в балансе бассейновой составляющей стока наносов [Дедков и др., 2008]. Однако мобилизованный на распаханых склонах материал должен проделать сложный путь по флювиальной сети от ареалов интенсивной эрозии до русла реки, прежде чем стать частью ее твердого стока. В процессе

транспорта велика вероятность того, что большая часть наносов, не достигнув русловой сети, будет на продолжительное время переотложена в пределах малого водосбора. Доля такой аккумуляции может преобладать в общей структуре баланса наносов [Sidorchuk, 2018].

Сформированные на склонах водосборов и в днищах малых долин аккумулятивные тела являются главным свидетельством процессов потери и выноса почвы за пределы эродируемых участков [Ларионов, 1993]. Исследование темпов накопления материала на аккумулятивных позициях в непосредственной близости от источника наносов позволяет косвенно оценить интенсивность потерь

почвы. Оценка интенсивности аккумуляции за разные временные интервалы дает возможность выявить тенденции в темпах поступления продуктов эрозии.

Такая задача требует применения надежных хронологических маркеров, которые позволяют производить датирование аккумулятивных толщ. Одним из таких маркеров выступает техногенный радионуклид ^{137}Cs . Геохимические особенности его поведения в окружающей среде, сравнительная простота гамма-спектрометрического определения и ограниченное число источников поступления в атмосферу сделали ^{137}Cs наиболее широко распространенным трассером при изучении эрозионно-аккумулятивных процессов [Ritchie, Ritchie, 2001]. В случае последовательного осадконакопления и отсутствия нарушений в вертикальном распределении радионуклида вследствие размыва или перемешивания отложений максимум содержания ^{137}Cs может быть отнесен к конкретному времени наиболее интенсивных атмосферных выпадений [Pennington et al., 1973; Kansanen et al., 1991; Kurikami et al., 2014].

На территории Восточно-Европейской равнины выделяются два таких максимума, относящихся к глобальным выпадениям в результате интенсивных ядерных испытаний в открытой атмосфере до начала 1960-х гг. [Болтнева и др., 1977] и к Чернобыльской аварии 1986 г. [Izrael et al., 1996; Golosov et al., 2013]. Поскольку период полураспада изотопа составляет 30,2 года, в настоящее время содержание ^{137}Cs бомбового происхождения сократилось более чем в 4 раза. Учитывая сравнительно невысокие уровни глобальных выпадений, точное определение содержания радионуклидов из данного источника становится все более трудной задачей, а в условиях интенсивного чернобыльского загрязнения разделение бомбового и чернобыльского ^{137}Cs практически невозможно. Вследствие высоких концентраций ^{137}Cs чернобыльских выпадений возможность его использования в качестве хрономаркера сохранится еще достаточно долго, что в том числе позволит проводить повторную оценку темпов аккумуляции на одних и тех же ключевых участках через продолжительные отрезки времени.

Целью данной работы является апробация методики количественной оценки изменений темпов накопления наносов в днище балки с полностью распаханном водосбором в зоне интенсивного Чернобыльского загрязнения. Предложенный набор методов позволил определить объемы и темпы аккумуляции агрогенных наносов за все время земледельческого освоения малого водосбора и за периоды 1986–2010 и 1986–2023 гг.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования был выбран малый водосбор в южной части Тульской области в зоне интенсивного радиоактивного загрязнения (рис. 1А). Водосбор располагается в пределах наиболее высокой части Среднерусской возвышенности – Плавского плато. Амплитуда высот в границах исследованной территории составляет 44 м – от 203 до 247 м, площадь водосбора – около 559 000 м². Большую часть малого бассейна (около 516 000 м²) занимают субгоризонтальные поверхности между-речий и пологие распахиваемые склоны крутизной до 6°. На долю долинного комплекса приходится около 43 000 м² (см. рис. 1Б).

Водосбор вытянут с юго-запада на северо-восток, и через его осевую часть проходит ежегодно перепахиваемая склоновая ложбина, переходящая в своей нижней части в сухую долину (балку) с задернованными и сравнительно крутыми бортами. Плановое положение границы пашни в месте подхода тальвега ложбины к вершине балки изменяется год от года в основном в зависимости от влажности почвы во время проведения весенних сельхозработ.

Согласно имеющимся историческим материалам, склоны водосбора распахивались как минимум с конца XVII в., и продолжительность агрогенного периода, когда могла проявляться ускоренная эрозия, насчитывает более 300 лет. Верхняя часть водосбора отделена дорогой, которая отмечена уже на плане Генерального межевания Чернского уезда, созданном в 1776–1780 гг. Выше по склону к дороге примыкает двурядная лесополоса, предположительно заложенная в 1950-х гг. на специально сформированных валах. На распаханном склоне выше лесополосы ложбина, идущая от вершины балки, морфологически слабо выражена, однако она концентрирует склоновый сток. На границе пашни у вала лесополосы формируется конус выноса. Идущая поперек падения склона лесополоса, особенно с учетом посадки деревьев на валах, является важным рубежом стока. До ее создания на пути транспортировки наносов из верхней части водосбора не было препятствий.

Борта малой долины на большей части своего протяжения отделены от пахотного склона напашью – невысоким валом, возникшим в результате отвальной вспашки и аккумуляции продуктов смыва с распаханых склонов. «Перелив» наносов через напашь и дальнейшее переотложение на задернованных бортах балки возможны только в местах концентрации склонового стока. Основная часть наносов транспортируется по ложбинной сети.

Ширина долины по бровкам плавно увеличивается от вершины и достигает 90 м в устьевой части. Борта полностью задернованы и имеют

крутизну до 15°. Зоны переотложения поступающих с пашни наносов на бортах балки четко маркируются более густым травянистым покровом с значительным участием сорной растительности в его составе. Днище неровное с преимущественно выпуклым поперечным профилем, в месте сочленения с бортами балки прослеживаются морфологически выраженные тальвеги. Между исследу-

дованными створами уклон дна изменяется в диапазоне 0,04–0,09. Ширина днища колеблется от нескольких метров в верховьях до 20 м в устьевой части. Положение и количество тальвегов меняется по течению долины. В приустьевой части днища наблюдается интенсивное врезание донных оврагов с высотой стенок вершинного перепада до 1,2–1,4 м.

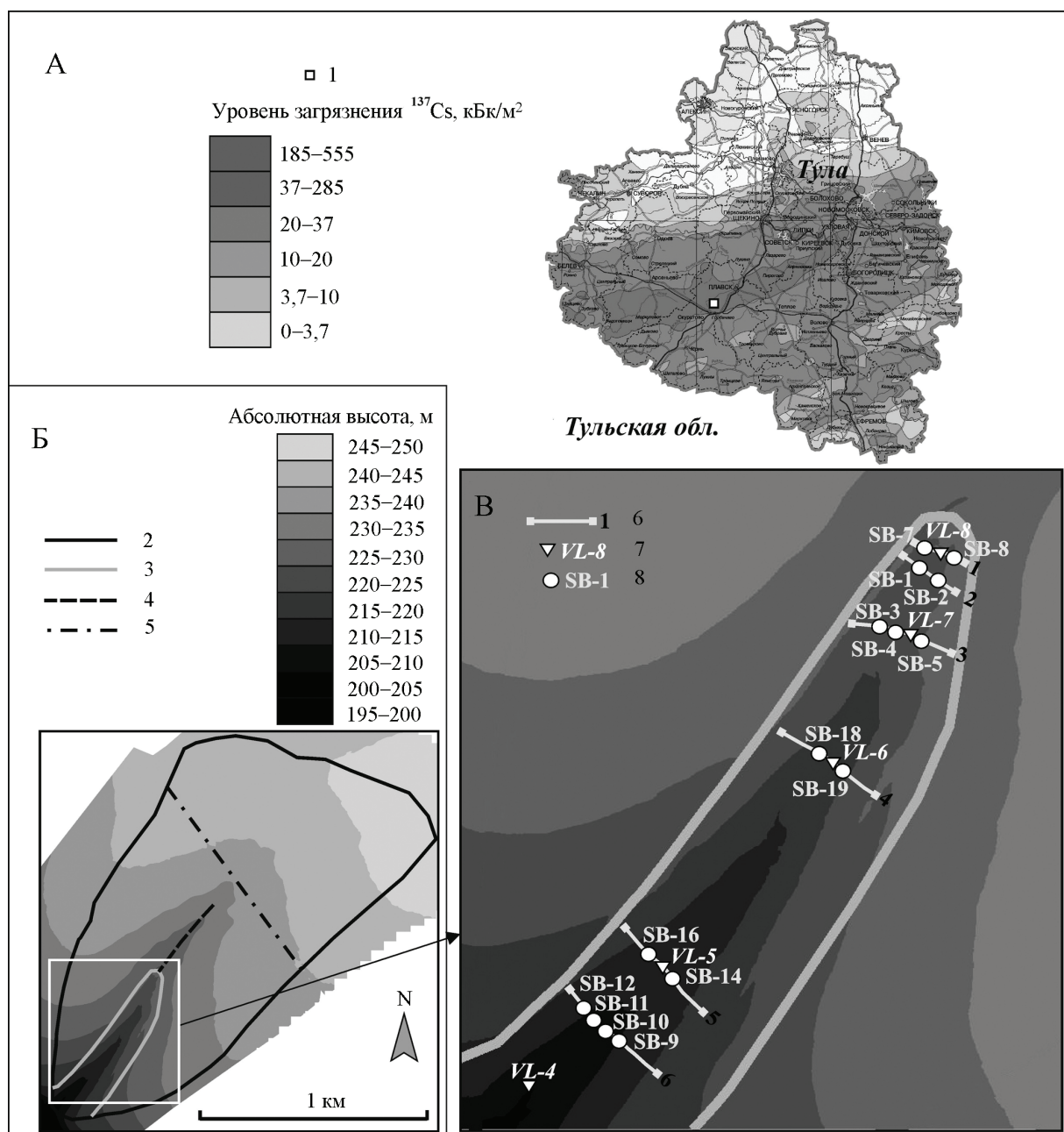


Рис. 1. Район исследований: А – карта радиоактивного загрязнения Тульской области [Атлас..., 2009]: 1 – расположение исследованного водосбора; Б – цифровая модель рельефа исследованного водосбора: 2 – граница водосбора; 3 – нижняя граница пашни; 4 – морфологически выраженный тальвег склоновой ложбины; 5 – дорога с лесополосой; В – расположение точек отбора образцов и бурения в днище долины: 6 – поперечные профили; 7 – почвенные разрезы; 8 – почвенные скважины

Fig. 1. Research area: А – map of radioactive contamination of the Tula region [Atlas..., 2009]: 1 – location of the catchment under study; Б – digital elevation model of the catchment: 2 – catchment boundary; 3 – lower cultivated field boundary; 4 – morphologically pronounced talweg of a slope hollow; 5 – road with shelterbelt; В – location of sampling and observation point: 6 – cross-sections of the dry valley (balka); 7 – soil sections; 8 – soil wells

В 2010 г. в днище описываемой балки уже проводились работы по изучению вертикального распределения ^{137}Cs чернобыльского происхождения на аккумулятивных позициях. Частично результаты исследований были опубликованы ранее [Иванов и др., 2016]. В нескольких створах в днище были заложены серии почвенных разрезов для послойного отбора образцов с заданной геометрией (см. рис. 1В). В каждом створе по крайней мере один разрез располагался в центральной части днища или тальвеге. Площадь отбора образцов составляла 10×10 см с шагом глубины 10 см. Общая глубина отбора задавалась произвольно и не превышала 60 см, что, однако, оказалось недостаточным, чтобы полностью отобрать толщу, загрязненную ^{137}Cs , и оценить мощность постчернобыльской аккумуляции в верховьях балки (разрез VL-7). Чтобы избежать подобной ситуации, в 2023 г. послойный отбор образцов был произведен с предварительным дозиметрическим обследованием стенки разреза, по результатам которого приблизительно оценивалась мощность загрязненной толщи. Отбор образцов осуществлялся с шагом по глубине 3 см в точках VL-8, VL-6, VL-5, VL-4 и 5 см в точке VL-7.

В лабораторных условиях образцы высушивались при температуре 105°C , затем перетирались и просеивались через сито с диаметром отверстий 2 мм. В подготовленных образцах содержание ^{137}Cs определяли с использованием гамма-спектрометрического комплекса СКС-07П(09П)_Г_Р производства компании ООО «ГринСтар» с относительной погрешностью определения удельной активности 5–10% в 2010 г., и гамма-спектрометра ORTEC (GEM30P40) с относительной погрешностью не более $\pm 7\%$ в 2023 г. Все значения гамма-активности были приведены с поправкой на радиоактивный распад к маю 1986 г. Полученные значения были использованы для построения графиков вертикального распределения удельной активности ^{137}Cs в заданных точках и оценке суммарных запасов радионуклида.

Плановые и высотные отметки бортов и днища малой долины, скважин и разрезов были определены при помощи ГНСС/GNSS PrinCe i50 (рис. 2А, Б). Для всей площади водосбора была произведена аэрофотосъемка территории участка с помощью БПЛА (DJI Mavic 2). Путем обработки полученных фотографий была получена ЦММ участка высокого разрешения. Для определения мощности толщи агрогенных наносов в 2023 г. было проведено ручное бурение с помощью почвенного бура производства компании Eijkelkamp. Скважины закладывали по шести поперечным профилям в днище балки таким образом, чтобы одна из скважин повторяла положение исследованного в 2010 г. почвенного

разреза (см. рис. 1В, профили 1, 3–5; рис. 2В–2З). Определение мощности агрогенной толщи проводили по положению кровли подстилающих пород, представленных лессовидными суглинками.

Суммарная аккумуляция наносов за разные временные периоды была рассчитана по формуле:

$$Q = S \cdot l \cdot \rho,$$

где Q – масса аккумулярованных наносов, т; S – средняя площадь поперечного сечения аккумулятивного тела в заданной части днища, м^2 ; l – длина участка днища, м; ρ – средняя плотность наносов, $\text{т}/\text{м}^3$.

Площадь поперечного сечения толщи агрогенных наносов определяли на основании глубины залегания кровли подстилающих пород непосредственно в днище и принимали нулевой в зоне тылового шва при переходе на борт долины. Поперечное сечение аккумулятивных тел, сформированных в постчернобыльское время, определялось как площадь треугольника с высотой, равной глубине залегания образца, датированного моментом выпадения ^{137}Cs в 1986 г., и основанием, равным ширине днища долины в конкретном створе. Такое допущение приводит к некоторому упрощению реальной геометрии аккумулятивного тела и, вероятно, занижает оценку его размеров. Длину расчетного участка определяли по карте, исходя из положения конкретных поперечных профилей. Средняя плотность оценивалась по отобраным образцам и составила $1100 \text{ кг}/\text{м}^3$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В верховьях долины наблюдается интенсивное накопление продуктов эрозии. Исследование 2010 г. показало, что за 24 года в точке VL-8 было аккумуляровано от 30 до 40 см наносов. Через 13 лет, в 2023 г., пик был заглублен на 20 см до 60–63 см (рис. 3А, Б). Средние темпы аккумуляции за рассматриваемые периоды оставались относительно стабильными: 1,3–1,7 см/год в 1986–2010 гг., 1,6–1,7 см/год в 1986–2023 гг. При сужении днища долины (см. рис. 2Б) фиксируется рост темпов аккумуляции. Даже неполный профиль вертикального распределения радионуклидов в 2010 г. (см. рис. 3В) указывает на то, что средний темп составлял не менее 2,6 см/год. Повторное обследование 2023 г. выявило, что с 1986 г. накопилась толща мощностью более 1 м (см. рис. 3Г), что соответствует средним темпам осадконакопления 2,8–3 см/год.

Ниже по долине глубина залегания пиковых значений активности ^{137}Cs в 2010 г. снижалась до 30–40 см в точке VL-6 (рис. 4А) и до 20–30 см в точках VL-5 и VL-4 (см. рис. 4В, Д). За период с 2010 по 2023 г. увеличение мощности аккумулятивной толщи до 51–54 см было обнаружено только в точке VL-6 (см. рис. 4Б). Средние темпы на-

копления материала (при данной точности оценки) остались теми же или сократились с 1,3–1,7 см/год в 1986–2010 гг. до 1,4–1,5 см/год в 1986–2023 гг. В точке VL-5 достоверное изменение мощности аккумулятивной толщи зафиксировать не удалось:

слой отложений, датированный 1986 г., в 2023 г. был обнаружен на глубине 27–30 см (см. рис. 4Г). Вполне вероятно, что в этой части днища в период 2010–2023 гг. не происходило поступления и перетолжения материала.

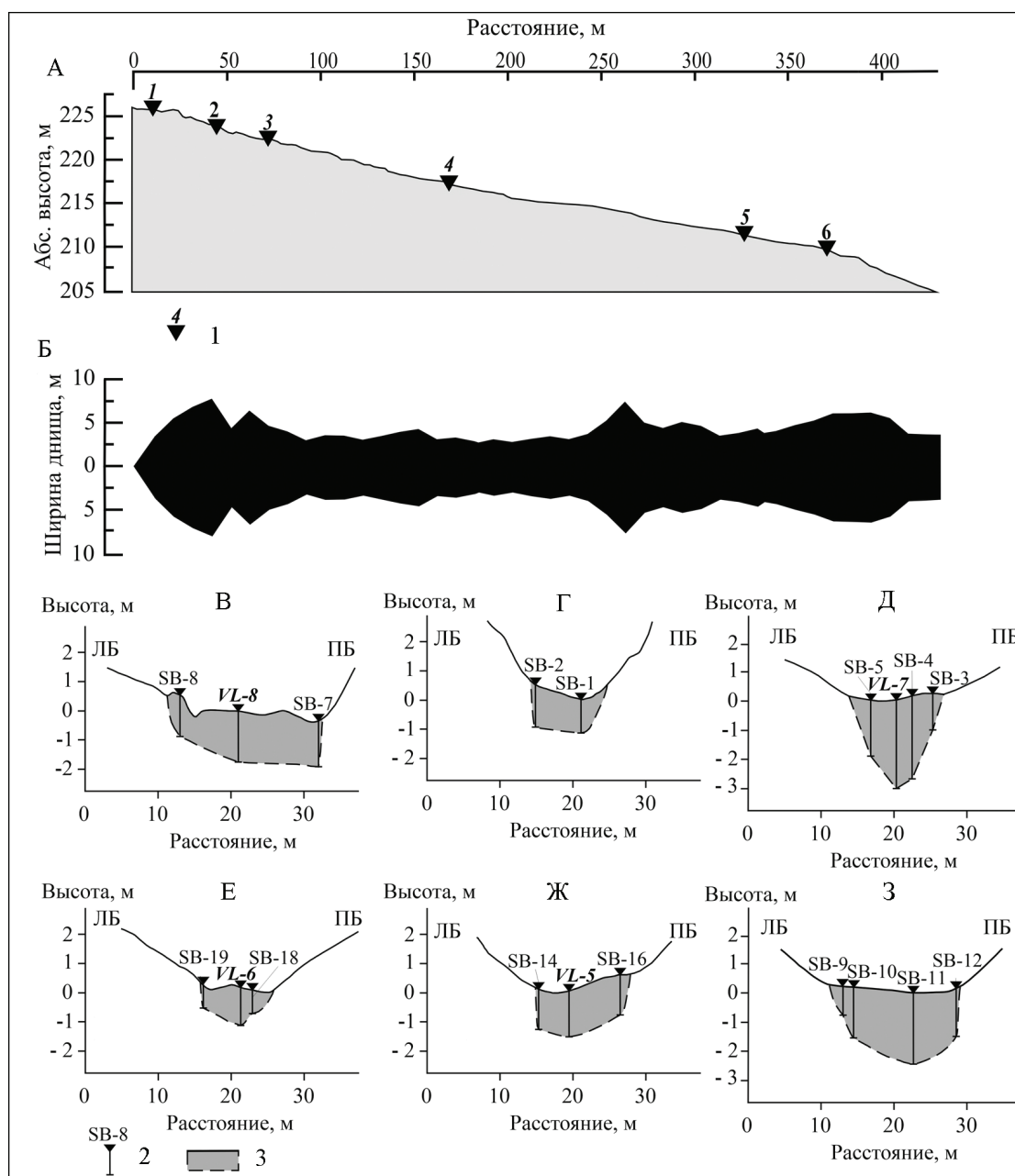


Рис. 2. Исследованный малый водосбор (балка): А – продольный профиль дна исследованной балки: 1 – расположение исследованных поперечных профилей; Б – изменение ширины дна по длине долины; В–З – поперечные профили через днище балки: 2 – почвенные скважины; 3 – агрогенные наносы

Fig. 2. The studied small catchment (ravine): А – longitudinal profile of the bottom of the studied ravine: 1 – location of the studied transverse profiles; Б – change in the width of the bottom along the length of the valley; В–З – transverse profiles through the bottom of the ravine: 2 – soil wells; 3 – agrogenic sediments

В случае последовательного отложения продуктов смыва с распаханых склонов в днище балки в вертикальном распределении ^{137}Cs в аккумулятивной толще отмечается постепенное снижение

удельной активности изотопа к поверхности. При постоянной глубине вспашки и смыве верхнего слоя почвы происходит ежегодное уменьшение концентрации радиоцезия в пахотном горизонте

за счет подпахивания нижележащего «чистого» материала. В приустьевой части днища в разрезе VL-4 в вертикальном распределении ^{137}Cs отсутствует корреляция концентрации радионуклида с глубиной, что указывает на нарушение последовательной аккумуляции (см. рис. 4Е). Нет четко выраженного максимума удельной активности, наблюдавшегося в 2010 г. (см. рис. 4Д), что не позволяет достоверно оценить мощность накопившихся отложений. Поскольку здесь происходит интенсивное врезание, можно предположить, что толща, исследованная в 2010 г., была размита в результате эрозии в днище, а после произошла повторная аккумуляция материала, поступившего

с участка выше по течению. При этом основным источником этого материала, вероятнее всего, послужил также локальный размыв днища, поскольку отсутствие аккумуляции после 2010 г. в расположенном выше по долине разрезе VL-5 указывает на то, что поступающие со склонов водосбора наносы в рассматриваемый период могли просто не достигать устья балки. Тем не менее даже с учетом произошедшего размыва и выноса отложений накопившегося материала оказалось достаточно, чтобы компенсировать потери. Допуская, что отобранный в 2023 г. материал отложился не позднее 2010 г., можно считать, что темпы аккумуляции составляли не менее 3,5 см/год.

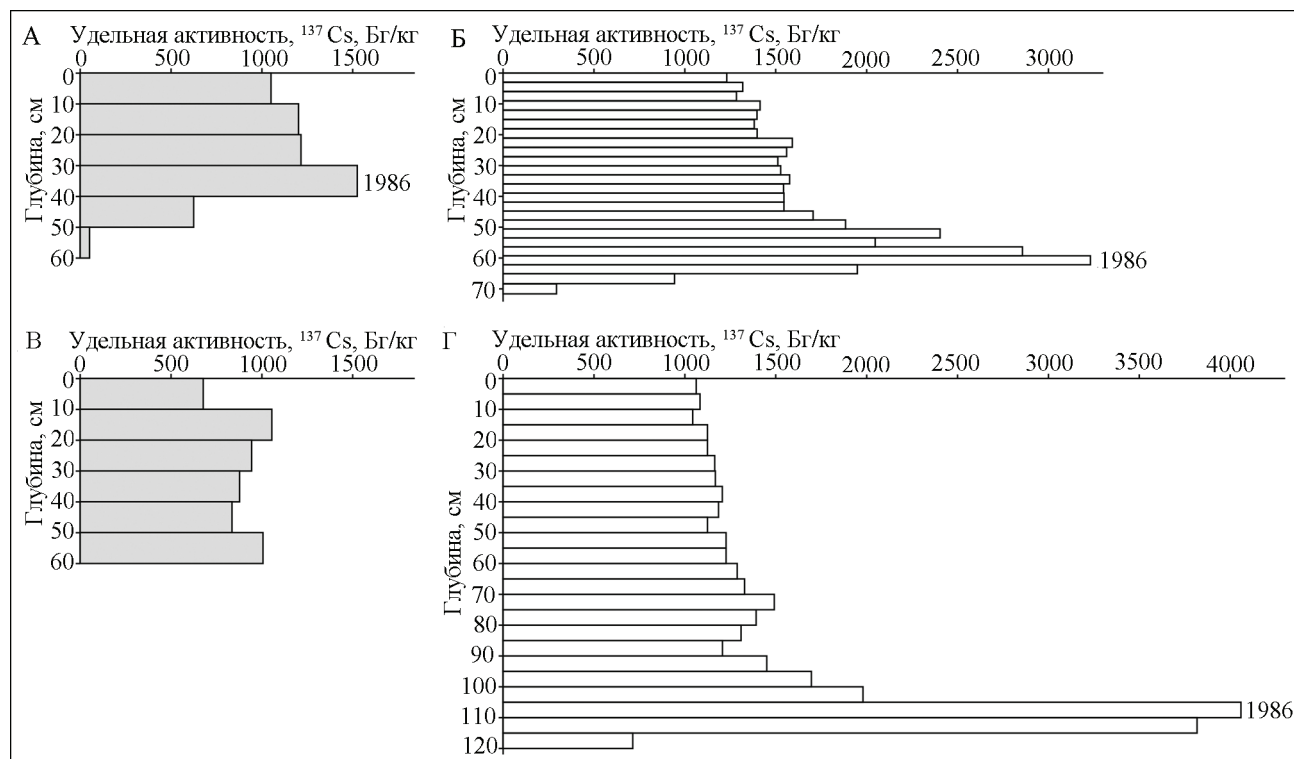


Рис. 3. Вертикальное распределение ^{137}Cs в аккумулярованных толщах в верховьях балки:

А – VL-8 в 2010 г.; Б – VL-8 в 2023 г.; В – VL-7 в 2010 г.; Г – VL-7 в 2023 г.

Fig. 3. Vertical distribution of ^{137}Cs in accumulated strata in the upper reaches of the ravine:

А – VL-8 in 2010; Б – VL-8 in 2023; В – VL-7 in 2010; Г – VL-7 in 2023

Исследование стратоземов с использованием глобального и черновыльского ^{137}Cs в качестве хрономаркеров показало, что для юго-западного сектора лесостепной зоны характерно сокращение темпов аккумуляции в послечерновыльское время по сравнению со второй половиной XX в. в связи со снижением потерь почвы на обрабатываемых склонах вследствие сокращения талого стока и изменения севооборотов [Golosov et al., 2017]. В дальнейшем эти выводы были подтверждены также для территории Татарстана [Шарифуллин и др., 2018] и Удмуртии [Гусаров и др., 2019].

Проведенное исследование позволило выявить динамику процесса аккумуляции в днище, указывающую на увеличение неравномерности распределения поступающего стока наносов за 13 лет. Отложение наносов преимущественно в верховьях балки может быть связано с сокращающейся интенсивностью склонового стока в весеннее время [Барабанов, Петелько, 2023] при отсутствии роста ливневых стокоформирующих осадков [Иванов и др., 2022]. Такая ситуация могла привести не только к сокращению темпов смыва, но и к снижению транспортирующей способности временных

водотоков уже в днище балки. Из-за малой площади днища балки переотложение даже меньшего объема эродированного материала обуславливает высокие темпы аккумуляции. Таким образом, данные, полученные по единичным точкам наблюдения, могут быть нерепрезентативными для выявления тенденций развития эрозии даже в пределах сравнительно компактных водосборов.

Маркелов [2004] отмечал, что «интенсивная аккумуляция в верховьях балок и долин приводит к увеличению уклонов днища и создает предпосылки для врезания». Исследование водосбора Гусиные лапки, располагающегося также в бассейне р. Плавы вблизи от объекта исследования, показали, что

отдельные эпизоды интенсивной аккумуляции могут существенно менять морфологию днища путем формирования выпуклых изгибов продольного профиля, сопровождаемых интенсивными донными врезами [Panin et al., 2001]. Неоднократное изменение уклонов приводит к чередованию во времени и пространстве участков врезания и аккумуляции. Неравномерное развитие процессов смыва, размыва и аккумуляции в эрозионных формах отмечено и в других регионах РФ [Рыжов, 2015]. Неравномерность накопления наносов создает условия для трансформации формы продольного профиля днища долины в виде увеличения перепада высот между верховьем и низовьем.

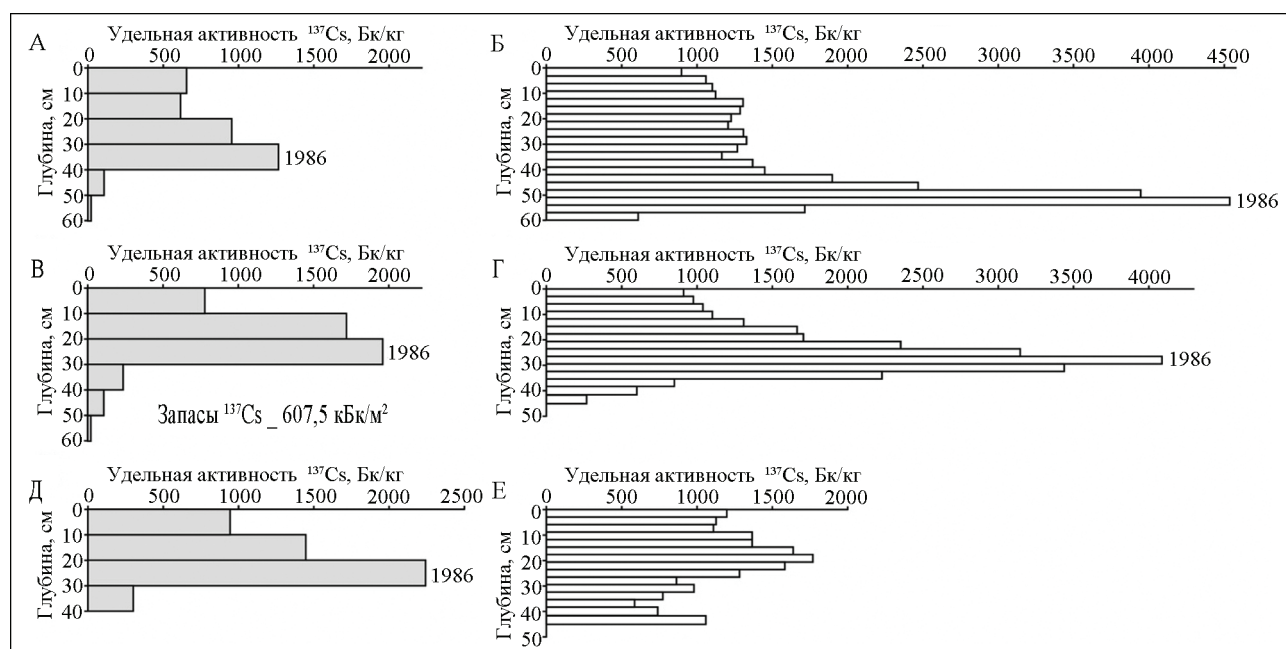


Рис. 4. Вертикальное распределение ^{137}Cs в аккумулятивных толщах в средней и нижней частях днища балки: А – VL-6 в 2010 г.; Б – VL-6 в 2023 г.; В – VL-5 в 2010 г.; Г – VL-5 в 2023 г.; Д – VL-4 в 2010 г.; Е – VL-4 в 2023 г.

Fig. 4. Vertical distributions of ^{137}Cs in accumulated sediments in the middle and lower reaches of the explored dry valley (balka): А – VL-6 in 2010; Б – VL-6 in 2023; В – VL-5 in 2010; Г – VL-5 in 2023; Д – VL-4 in 2010; Е – VL-4 in 2023

В последние десятилетия заполнение долины происходит в среднем более интенсивно, чем за весь предшествующий период хозяйственного освоения. Практически на всех участках днища балки, где в послечернобыльский период шла последовательная аккумуляция материала, средние темпы седиментации оказываются существенно выше, чем за предыдущие почти три столетия (табл.). Однако необходимо с большой осторожностью делать выводы на основании прямого сравнения этих показателей. Пространственная картина развития эрозионно-аккумулятивных процессов в днище скорее всего испытывала существенные изменения даже в пределах более коротких временных отрезков, как было показано выше на примере разреза VL-4.

На всем участке днища балки от 1-го до 5-го створа (см. рис. 1В) за 37 лет накопилось около четверти от всей агрогенной толщи: 1475–1566,8 из 6375,3 т. В среднем после Чернобыльской аварии аккумуляровалось 39,9–42,3 т наносов ежегодно, что более чем в 2 раза превышает средние показатели за весь период хозяйственного освоения (19,3 т в год) и до Чернобыльской аварии (16,2–16,6 т в год). Такое различие указывает на нелинейный характер развития рельефа днища балки. Учитывая текущее сокращение талого стока и способы ведения сельского хозяйства, можно предположить, что при других климатических условиях и распашке вдоль склона количество поступающих в балку наносов превышало современное. Следовательно, в прошлом эффективность транс-

портировки материала по днищу балки и вынос за ее пределы должны были быть значительно выше, чем в конце XX и первой четверти XXI в. В бассейне р. Плавы, притоком которой является Локна, именно бесприточные малые суходольные долины с относительно высокими уклонами днищ являются основными поставщиками бассейновых наносов [Безухов и др., 2014]. Возможно, вследствие более высокой, чем современная, степени транзитности балок-притоков р. Локны, постоянный сток воды, зафиксированный на плане Генерального межевания (конец XVIII в.), полностью прекратился уже к 1840-м гг., поскольку на датируемой этим периодом Военно-топографической карте Тульской губернии долина р. Локны показана как суходольная. Таким образом, полученные данные указывают на то, что режим протекания эрозионно-аккумулятивных процессов испытал как минимум одну серьезную трансформацию, а вероятнее всего, она не была единственной. Получение более детальных свидетельств об имев-

ших место подобных изменениях требует привлечения дополнительных хронологических маркеров для датировки уже аккумулярованных толщ. Большой потенциал имеет исследование накопления в почве сферических магнитных частиц [Jones, Olson, 1990; Gennadiev et al., 2013], что может повысить детальность оценки осадконакопления начиная со второй половины XIX в., когда малые речные системы испытывали серьезные изменения. Общее сокращение русловой сети в бассейне р. Плавы более чем на треть имело место в период с 1830-х до 1940-х гг., когда большинство водотоков первого и второго порядка были полностью заполнены наносами, мобилизованными с возделываемых склонов [Golosov, Panin, 2006]. Продолжение повторных работ на уже исследованных участках и выбор новых объектов для мониторинга создадут возможность для изучения современных и будущих средне- и долгосрочных тенденций развития эрозионных процессов и баланса наносов.

Таблица

Средние темпы аккумуляции наносов в днище балки за разные временные интервалы на участках с последовательной аккумуляцией

Разрез	Временной период		
	1690–1986 гг.	1690–2023 гг.	1986–2023 гг.
VL-8	0,4	0,5	1,6–1,7
VL-7	0,7	0,9	2,8–3
VL-6	0,3	0,9	1,4–1,5
VL-5	0,4	0,5	0,7–0,8

ВЫВОДЫ

Аккумуляция продуктов ускоренной эрозии в балочной сети является важной составляющей баланса наносов сельскохозяйственных водосборов, способной динамично меняться в течение относительно непродолжительного периода и требующей разработки методик количественной оценки за разные интервалы времени.

Методика повторного послойного отбора и определения содержания ¹³⁷Cs чернобыльского происхождения оказалась эффективной для оценки динамики накопления наносов на участках со

стабильной тенденцией к аккумуляции. В случае вторичного врезания и нарушения вертикального распределения радионуклидов возможность точного определения мощности аккумуляции пропадает. Однако возникает надежное свидетельство изменений в развитии эрозионно-аккумулятивных процессов.

Перспективы исследований распределения ¹³⁷Cs в отложениях днищ балочной сети и, в частности, на участках последовательной аккумуляции связаны с привлечением дополнительных хронологических маркеров и проведением повторного отбора образцов на регулярной основе в будущем.

Благодарность. Работа выполнена в рамках проекта РНФ 23-77-10045 https://rscf.ru/prjcard_int?23-77-10045&ysclid=m9icjxgw9j405262876.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси (АСПА Россия–Беларусь) / под ред. Ю.А. Израэля, И.М. Богдевича. М.: Фонд «Инфосфера – НИА – Природа»; Минск: Белкартография, 2009. 140 с.

Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси (АСПА Россия–Беларусь) / под ред. Ю.А. Израэля, И.М. Богдевича. М.: Фонд «Инфосфера – НИА – Природа»; Минск: Белкартография, 2009. 140 с.

- Барабанов А.Т., Петелько А.И. Факторы склонового весеннего стока на серых лесных почвах в центральной лесостепи // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2023. № 4. С. 18–27. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.4.2.
- Безухов Д.А., Беляев В.Р., Иванова Н.Н. Количественная оценка интенсивности и направленности эрозионно-аккумулятивных процессов на обрабатываемых склонах в пределах бассейна р. Плавы (Тульская область) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5: Геогр. 2014. № 6. С. 16–23.
- Болтнева Л.И., Израэль Ю.А., Ионов В.А. и др. Глобальное загрязнение цезием-137 и стронцием-90 и дозы внешнего облучения на территории СССР // Атомная энергия. 1977. Т. 42(5). С. 355–360.
- Гусаров А.В., Рысин И.И., Шарифуллин А.Г. и др. Оценка современного тренда эрозионно-аккумулятивных процессов в малом распаханном водосборе с использованием цезия-137 в качестве хрономаркера (юг Удмуртской Республики) // Геоморфология и палеогеография. 2019. № 2. С. 37–56.
- Дедков А.П., Гусаров А.В., Мозжерин В.В. Две системы эрозии в речных бассейнах равнин Земли и их взаимная трансформация // Геоморфология, 2008. № 4. С. 3–16.
- Ермолаев О.П. Эрозия в бассейновых геосистемах. Казань: Унипресс, 2002. 264 с.
- Иванов М.М., Иванова Н.Н., Голосов В.Н. и др. Оценка накопления сорбированного изотопа ^{137}Cs в верхних звеньях флювиальной сети в зоне чернобыльского загрязнения // География и природные ресурсы. 2016. № 4. С. 156–163. DOI: 10.1134/S1875372816040107.
- Иванов М.М., Цыпленков А.С., Голосов В.Н. Современные тенденции развития эрозионно-аккумулятивных процессов и геоморфологическая связанность потоков наносов в бассейне р. Упы // Эрозия почв и русловые процессы. Тр. науч.-исслед. лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева. 2022. Т. 22. С. 66–97.
- Ларионов Г.А. Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки. М.: Изд-во МГУ, 1993. 198 с.
- Лисецкий Ф.Н., Светличный А.А., Черный С.Г. Современные проблемы эрозиоведения / под ред. А.А. Светличного. Белгород: Константа, 2012. 456 с.
- Маркелов М.В. Современные эрозионно-аккумулятивные процессы в верхних звеньях гидрографической сети лесной и лесостепной зон: дис. ... канд. геогр. наук. М., 2004. 198 с.
- Рыжов Ю.В. Формирование оврагов на юге Восточной Сибири. Новосибирск: ГЕО, 2015. 180 с.
- Шарифуллин А.Г., Гусаров А.В., Голосов В.Н. Современный тренд эрозионно-аккумулятивных процессов в малом распаханном водосборе, Республика Татарстан // Геоморфология и палеогеография. 2018. № 3. С. 93–108. DOI: 10.7868/S0435428118030082.
- Gennadiev A.N., Koshovskii T.S., Zhidkin A.P. et al. Lateral migration of soil solid-phase material within a landscape-geochemical arena detected using the magnetic tracer method, *Eurasian Soil Science*, 2013, vol. 46(10), p. 983–993, DOI: 10.1134/S1064229313100037.
- Golosov V.N., Belyaev V.R., Markelov M.V. Application of Chernobyl-derived ^{137}Cs fallout for sediment redistribution studies: lessons from European Russia, *Hydrological processes*, 2013, vol. 27(6), p. 781–794, DOI: 10.1002/hyp.9470.
- Golosov V., Panin A. Century-scale stream network dynamics in the Russian Plain in response to climate and land use change, *Catena*, 2006, vol. 66(1–2), p. 74–92, DOI: 10.1016/j.catena.2005.07.011.
- Golosov V.N., Ivanova N.N., Gusarov A.V. et al. Assessment of the Trend of Degradation of Arable Soils on the Basis of Data on the Rate of Stratozem Development Obtained with the Use of ^{137}Cs as a Chronomarker, *Eurasian Soil Science*, 2017, vol. 50, no. 10, p. 1195–1208, DOI: 10.1134/S1064229317100039.
- Izrael Y.A., De Cort M., Jones A.R. et al. The atlas of cesium-137 contamination of Europe after the Chernobyl accident, *Proceedings of the first international conference "The radiological consequences of the Chernobyl accident"*, Luxembourg, 1996, p. 1–10.
- 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(3), p. 855–859, DOI: 10.2136/sssaj1990.03615995005400030040x.
- Kansanen P.H., Jaakkola T., Kulmala S. et al. Sedimentation and distribution of gamma-emitting radionuclides in bottom sediments of southern Lake Päijänne, Finland, after the Chernobyl accident, *Hydrobiologia*, 1991, vol. 222, p. 121–140, DOI: 10.1007/BF00006100.
- Kurikami H., Kitamura A., Yokuda S.T. et al. Sediment and ^{137}Cs behaviors in the Ogaki Dam Reservoir during a heavy rainfall event, *Journal of environmental radioactivity*, 2014, vol. 137, p. 10–17, DOI: 10.1016/j.jenvrad.2014.06.013.
- Panin A.V., Walling D.E., Golosov V.N. The role of soil erosion and fluvial processes in the post-fallout redistribution of Chernobyl-derived caesium-137: a case study of the Lapki catchment, Central Russia, *Geomorphology*, 2001, vol. 40(3–4), p. 185–204, DOI: 10.1016/S0169-555X(01)00043-5.
- Pennington W., Tutin T.G., Cambray R.S. et al. Observations on lake sediments using fallout ^{137}Cs as a tracer, *Nature*, 1973, vol. 242(5396), p. 324–326, DOI: 10.1038/242324a0.
- Ritchie J.C., Ritchie C.A. Bibliography of publications of ^{137}Cs studies related to erosion and sediment deposition, *USDA – ARS Hydrology and Remote Sensing Laboratory Occasional Paper HRSL-2007-01*, USDA – Agricultural Research Service, Beltsville, MD, USA, 2007, p. 11–15.
- Sidorchuk A.Y. The fluvial system on the East European plain: sediment source and sink, *Geography, Environment, Sustainability*, 2018, vol. 11(3), p. 5–20, DOI: 10.24057/2071-9388-2018-11-3-05-20.
- Zuazo V.H.D., Pleguezuelo C.R.R. Soil-erosion and runoff prevention by plant covers: a review, *Sustainable agriculture*, 2009, p. 785–811, DOI: 10.1007/978-90-481-2666-8_48.

Поступила в редакцию 04.04.2025

После доработки 11.05.2025

Принята к публикации 20.05.2025

ACCUMULATION OF ACCELERATED EROSION PRODUCTS IN THE BOTTOM OF A SMALL DRY VALLEY (BALKA) WITH CULTIVATED CATCHMENT USING THE RADIOCESIUM STUDIES

M.M. Ivanov¹, N.N. Ivanova², P.I. Fominykh³, N.N. Lugovoy⁴

¹⁻³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography,
Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes
^{1, 3, 4} Institute of Geography RAS

¹ Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: ivanovm@bk.ru

² Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: nadine_iv@mail.ru

³ Engineer-Researcher; e-mail: foma41polina@gmail.com

⁴ Senior Scientific Researcher; e-mail: lugovoy-n@ya.ru

Accumulation of sediments in the upper sections of a fluvial network is among the main evidences of accelerated erosion on the slopes during the period of agricultural use of the catchment area. The study of the vertical distribution of technogenic ¹³⁷Cs within the Chernobyl-induced pollution areas makes it possible to estimate the intensity of accumulation over the period after its fallout. The paper presents an attempt of assessing changes in sedimentation rates in the bottom of a small dry valley (balka) with totally plowed catchment area in the southern Tula region. The dynamics of deposition of soil erosion products was identified for the periods 1986–2010 and 1986–2023 by repeated layer-by-layer sampling in the bottom and determining the depth of the Chernobyl-induced peak of ¹³⁷Cs concentration. Manual drilling was also carried out in the valley floor to determine the thickness of agrogenic sediments that began to accumulate since the end of the 17th century. The results of the study showed that in the post-Chernobyl stage the accumulation was more intensive in comparison with the entire period of agricultural use. The sedimentation process is characterized by significant spatial and temporal heterogeneity. An increase in the rate of accumulation is observed in the upper reaches of the valley and in the bottom narrowings (from 0.4–0.7 to 1.6–3 cm per year). No increase in the depth of the accumulated stratum was recorded in the lower and estuary parts; there is a predominance of overflowing and removal of previously deposited material away from the catchment area. On the average, 39.9–42.3 tons of sediment accumulated in the balka annually after the Chernobyl accident, which is more than twice the average for the entire period of economic development (19.3 tons per year). In the future, while maintaining the observed trend, the slope of the bottom will become steeper, thus activating the existing bottom cuts and producing new ones. The experience gained has shown that repeated radiocesium studies could be an important tool for assessing long-term changes in erosion-accumulative processes and sediment balance within catchments with high anthropogenic load.

Keywords: sediment load, ¹³⁷Cs, repeated sampling, Chernobyl contamination, Tula region, Central Russian Upland

Acknowledgements. The work was financially supported by the Russian Science Foundation (project 23-77-10045 https://rscf.ru/prjcard_int?23-77-10045&ysclid=m9icjxgw9j405262876).

REFERENCES

- Atlas sovremennyh i prognoznyh aspektov posledstvij aviarii na Chernobyl'skoj AES na postradavshih territoriyah Rossii i Belarusi (ASPA Rossiya-Belarus')* [Atlas of actual and forecasted effects of the Chernobyl NPS accident within the affected areas of Russia and Belarus], Yu.A. Izrael', I.M. Bogdevich (eds.), Moscow, Infosphere-NIA-Priroda Foundation Publ., Minsk, Belkartografiya, Publ., 2009. (In Russian)
- Barabanov A.T. Petel'ko A.I. Faktory sklonovogo vesennego stoka na seryh lesnyh pochvah v central'noj lesostepi [Factors of slope spring runoff on gray forest soils in the central forest-steppe], *Vest. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2023, no. 4, p. 18–27, DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.4.2. (In Russian)
- Bezuhov D.A., Beljaev V.R., Ivanova N.N. Kolichestvennaja ocenka intensivnosti i napravlenosti erozionno-akkumuljativnyh processov na obrabatyvaemyh sklonah v predelah bassejna r. Plava (Tul'skaja oblast') [Quantitative assessment of intensity and trend of erosion and accumulation processes on cultivated slopes within the Plava River basin (the Tula oblast)], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2014, no. 6, p. 16–23. (In Russian)
- Boltneva L.I., Izrael' Ju.A., Ionov V.A., Nazarov I.M. Global'noe zagraznenie ceziem-137 i stronciem-90 i dozy vneshnego obluchenija na territorii SSSR [Global contamination with caesium-137 and strontium-90 and external radiation doses within the USSR territory], *Atomnaya energiya*, 1977, vol. 42(5), p. 355–360. (In Russian)
- Dedkov A.P., Gusarov A.V., Mozzherin V.V. Dve sistemy erozii v rechnyh bassejnah ravnin Zemli i ih vzaimnaja transformacija [Two erosion systems in river basins of the Earth's plains and their mutual transformation], *Geomorphologiya*, 2008, no. 4, p. 3–16. (In Russian)

- Ermolaev O.P. *Erosia v basseinovykh geosistemakh* [Erosion in basin geosystems], Unipress Publ., 2002, 264 p. (In Russian)
- Gennadiyev A.N., Koshovskii T.S., Zhidkin A.P., 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(10), p. 983–993, DOI: 10.1134/S1064229313100037.
- Golosov V., Panin A. Century-scale stream network dynamics in the Russian Plain in response to climate and land use change, *Catena*, 2006, vol. 66(1–2), p. 74–92, DOI: 10.1016/j.catena.2005.07.011.
- Golosov V.N., Belyaev V.R., Markelov M.V. Application of Chernobyl-derived ^{137}Cs fallout for sediment redistribution studies: lessons from European Russia, *Hydrological processes*, 2013, no. 27(6), p. 781–794, DOI: 10.1002/hyp.9470.
- Golosov V.N., Ivanova N.N., Gusarov A.V., Sharifullin A.G. Assessment of the Trend of Arable Soils Degradation on the Basis of Data on the Rate of Stratozem Development Obtained with ^{137}Cs as a Chronomarker, *Eurasian Soil Science*, 2017, vol. 50, no. 10, p. 1195–1208, DOI: 10.1134/S1064229317100039.
- Gusarov A.V., Rysin I.I., Sharifullin A.G., Golosov V.N. Ocenka sovremennogo trenda jerozionno-akkumulativnykh processov v malom raspahannom vodosbore c ispol'zovaniem cezija-137 v kachestve hronomarkera (jug Udmurtskoj Respubliki) [Assessment of modern trend in erosion and accumulation processes within a small agricultural catchment using Cs-137 as a chronomarker (south of Udmurtiya Republic)], *Geomorfologiya*, 2019, no. 2, p. 37–56. (In Russian)
- Ivanov M.M., Ivanova N.N., Golosov V.N., Shamshurina E.N. Ocenka nakopleniya sorbirovannogo izotopa ^{137}Cs v verkhnykh zven'jakh fluvial'noj seti v zone chernobyl'skogo zagrizneniya [Assessing the accumulation of sorbed ^{137}Cs isotope within the upper components of fluvial network in the zone of Chernobyl contamination], *Geography and Natural Resources*, 2016, vol. 37, no. 4, p. 355–361, DOI: 10.1134/S1875372816040107.
- Ivanov M.M., Tsyplenkov A.S., Golosov V.N. [Modern trends in development of erosion and accumulation processes and geomorphic connectivity in the Upa River basin], *Erozija pochv i ruslovyje processy* [Soil erosion and channel processes], Proc. of the research laboratory of soil erosion and riverbed processes named after N.I. Makaveev, 2022, vol. 22, p. 66–97. (In Russian)
- Izrael Y.A., De Cort M., Jones A.R. et al. The atlas of cesium-137 contamination of Europe after the Chernobyl accident, *Proceedings of the first international conference "The radiological consequences of the Chernobyl accident"*, Luxembourg, 1996, p. 1–10.
- Kansanen P.H., Jaakkola T., Kulmala S. et al. Sedimentation and distribution of gamma-emitting radionuclides in bottom sediments of southern Lake Päijänne, Finland, after the Chernobyl accident, *Hydrobiologia*, 1991, vol. 222, p. 121–140, DOI: 10.1007/BF00006100.
- Kurikami H., Kitamura A., Yokuda S.T. et al. Sediment and ^{137}Cs behaviors in the Ogaki Dam Reservoir during a heavy rainfall event, *Journal of environmental radioactivity*, 2014, vol. 137, p. 10–17, DOI: 10.1016/j.jenvrad.2014.06.013.
- Larionov G.A. *Erozija i defljacija pochv: osnovnye zakonomernosti i kolichestvennye ocenki* [Erosion and deflation of soil: basic patterns and quantitative estimates], Moscow, Izd-vo MGU Publ., 1993, 198 p. (In Russian)
- Lisetskyi F.N., Svetlichnyj A.A., Chernyj S.G. *Sovremennye problemy eroziovedeniya* [Modern problems of erosion studies], A.A. Svetlichnyj (ed.), Belgorod, Constanta Publ., 2012, 456 p. (In Russian).
- Markelov M.V. *Sovremennye erozionno-akkumulativnyye processy v verkhnykh zven'jakh gidrograficheskoy seti lesnoj i lesostepnoj zon* [Modern erosion and accumulation processes in the upper reaches of hydrographic network within forest and forest-step zones], Ph.D. Thesis in Geography, Moscow, 2004, 198 p. (In Russian)
- Panin A.V., Walling D.E., Golosov V.N. The role of soil erosion and fluvial processes in the post-fallout redistribution of Chernobyl-derived caesium-137: a case study of the Lapki catchment, Central Russia, *Geomorphology*, 2001, no. 40(3–4), p. 185–204, DOI: 10.1016/S0169-555X(01)00043-5.
- Pennington W., Tutin T.G., Cambray R.S., Fisher E.M. Observations on lake sediments using fallout ^{137}Cs as a tracer, *Nature*, 1973, vol. 242(5396), p. 324–326, DOI: 10.1038/242324a0.
- Ritchie J.C., Ritchie C.A. Bibliography of publications of ^{137}Cs -Cesium studies related to erosion and sediment deposition, *USDA – ARS Hydrology and Remote Sensing Laboratory Occasional Paper HRSR-2007-01*, USDA – Agricultural Research Service, Beltsville, MD, USA, 2007, p. 11–15.
- Ryzhov Ju.V. *Formirovanie ovragov na jube Vostochnoj Sibiri* [Formation of gullies in the south of East Siberia], Novosibirsk, GEO Publ., 2015, 180 p. (In Russian)
- Sharifullin A.G., Gusarov A.V., Golosov V.N. Sovremennyy trend jerozionno-akkumulativnykh processov v malom raspahannom vodosbore, Respublika Tatarstan [Modern trend in erosion and accumulation processes within a small agricultural catchment, Republic Tatarstan], *Geomorfologiya i paleogeografiya*, 2018, no. 3, p. 93–108, DOI: 10.7868/S0435428118030082.
- Sidorchuk A.Y. The fluvial system on the East European plain: sediment source and sink, *Geography, Environment, Sustainability*, 2018, vol. 11(3), p. 5–20, DOI: 10.24057/2071-9388-2018-11-3-05-20.
- Zuazo V.H.D., Pleguezuelo C.R.R. Soil-erosion and runoff prevention by plant covers: a review, *Sustainable agriculture*, 2009, p. 785–811, DOI: 10.1007/978-90-481-2666-8_48.

Received 04.04.2025

Revised 11.05.2025

Accepted 20.05.2025