

ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 551.4, 631.2, 910.3

**ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ ЧЕРНОБЫЛЬСКОГО
ЗАГРЯЗНЕНИЯ И ТЕМПОВ СМЫВА ПАХОТНЫХ
ПОЧВ ПУТЕМ ПОВТОРНОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ**

© 2024 г. М. М. Иванов^{a, b, *}, Н. Н. Иванова^b, В. Н. Голосов^{a, b},
А. А. Усачева^{a, c}, Г. А. Смолина^d, Д. В. Фомичева^e

^aИнститут географии РАН, Старомонетный пер., 29, стр. 4, Москва, 119017 Россия

^bГеографический факультет, МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

^cИГЕМ РАН, Старомонетный пер., 35, Москва, 119017 Россия

^dМСХА им. К. А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, Москва, 127434 Россия

^eПочвенный институт им. В.В. Докучаева РАН, Пыжевский пер., 7, стр. 2, Москва, 119017 Россия

*e-mail: ivanovm@bk.ru

Поступила в редакцию 30.01.2024 г.

После доработки 06.04.2024 г.

Принята к публикации 10.04.2024 г.

Трансформация радиоактивного загрязнения сельскохозяйственных земель изотопом ^{137}Cs служит одним из свидетельств проявления эрозии почвы. Количественная оценка изменения запасов радионуклида и соответствующих им темпов потери почвы может быть осуществлена методом повторного отбора интегральных образцов почвы на ключевых участках через продолжительные интервалы времени. Такие исследования сравнительно немногочисленны и в зоне интенсивного чернобыльского загрязнения в Центральной России ранее не проводились. Метод повторного пробоотбора был использован в 2023 г. в пределах распахиваемых склонов малого водосбора в южной части Тульской области через 26 лет после проведения аналогичной процедуры в 1997 г. Произошедшие за этот период изменения запасов ^{137}Cs оказались статистически значимыми, в среднем сокращение составило более 10%. Согласно пропорциональной конверсионной модели эрозии, использующей относительные изменения запасов ^{137}Cs , среднесуточный темп смыва был оценен в 11.7 т/га в год. Такие величины потерь почвы в целом сопоставимы с опубликованными ранее результатами независимого математического моделирования для этой территории. Таким образом, использование метода повторного пробоотбора, в том числе на новых объектах, является перспективным для оценки темпов потерь почвы и дает возможность верифицировать существующие модели эрозии, а также отслеживать долгосрочные тенденции пространственной трансформации радиоактивного загрязнения.

Ключевые слова: водная эрозия, радиоцезиевый метод, радионуклиды, Chernic Phaeozems

DOI: 10.31857/S0032180X24090078, **EDN:** WLVOZW

ВВЕДЕНИЕ

Массовая распашка земель в бассейнах равнинных рек умеренного пояса способствует активизации водной эрозии на обрабатываемых склонах и ускоренной деградации почв [5, 10, 33, 50]. Кроме того, водная эрозия на пашне является основным механизмом латеральной миграции загрязнителей [22, 29, 55], включая техногенные радионуклиды, попавшие в окружающую среду вследствие испытаний ядерного оружия или аварий на объектах атомной промышленности [17, 27].

При этом отсутствие мониторинговых наблюдений за смывом почвы на пахотных водосборах [40] или короткие временные промежутки между отбором проб почвы [21] затрудняют получение полевых данных о фактических темпах смыва в пределах освоенных междуречных склонов. Ряд других методов оценки среднегодовых потерь почвы с пахотных склонов за длительные (более 10 лет) периоды, а именно использование искусственных ловушек наносов, таких как водозадерживающие валы, располагающиеся вдоль нижних краев пашен выше

вершин оврагов [10, 35], или небольшие пруды, сооруженные в днищах малых эрозионных форм, собирающих сток воды и наносов с пахотных склонов [51], позволяют оценивать объемы суммарных потерь почвы с фиксированной площади. Однако на основе определения объемов наносов, переотложившихся в таких ловушках, не могут быть выявлены различия в темпах смыва внутри различных частей пахотных склонов.

В качестве альтернативы для оценки темпов смыва и перераспределения наносов по площади пашни широко используются косвенные методы, среди которых важное место занимают исследования распределения и миграции техногенного радионуклида ^{137}Cs . В силу своих химических особенностей миграция ^{137}Cs происходит в связанном с минеральными частицами состоянии [14, 31]. Изменения суммарного содержания (запасов) ^{137}Cs в пределах пахотных склонов могут быть пересчитаны с помощью конверсионных математических моделей в темпы перераспределения почвенного материала в результате эрозионной деятельности и механического воздействия на почву в процессе сельскохозяйственной обработки [53].

При однократном пробоотборе относительное изменение запасов за период с момента выпадения радионуклидов из атмосферы до момента отбора проб не может быть измерено напрямую. Производится сопоставление содержания радионуклида в каждой точке отбора с его содержанием в пробе, отобранной на близлежащей ненарушенной геоморфологической позиции, где изменения содержания радионуклидов в почве происходили только за счет процесса радиоактивного распада [41]. Базовой проблемой данного подхода является пространственная вариабельность начального выпадения радионуклидов на поверхность почвы [48], в результате чего полученные значения могут вызывать обоснованные сомнения [44]. Более надежным является подход, когда изменения запасов радионуклидов-трассеров определяются на основе повторного отбора проб в фиксированных точках, расположенных в различных частях обрабатываемых склонов через отрезки времени, достаточные для проявления эрозионной деятельности [23, 30, 36, 38]. К настоящему времени данный подход использовался на малых пахотных водосборах по всему миру, где загрязнение почвы было связано с глобальными выпадениями ^{137}Cs , происходившими в период проведения ядерных взрывов в открытой атмосфере [24, 34, 37, 39, 49], и регионах, где соотношение чернобыльских и глобальных выпадений ^{137}Cs было близко к 1 [19, 46, 47].

В пределах центра европейской части России, где доля пахотных земель высока, имеются значительные площади, в пределах которых глобальные выпадения ^{137}Cs пренебрежимо малы в сравнении со вкладом от Чернобыльской аварии [9, 25].

При этом до настоящего времени методика повторного отбора проб ^{137}Cs для определения темпов перераспределения наносов на пашне на территориях России, подвергшихся значительному чернобыльскому загрязнению, не использовалась.

Цель работы — оценка возможности применения результатов повторного пробоотбора (re-sampling) ^{137}Cs для количественных оценок темпов перераспределения наносов на пашне за длительный период (более 25 лет) в регионах с уровнями радиоактивного загрязнения после аварии на Чернобыльской АЭС, существенно (в 2 раза и более) превышающих глобальные выпадения данного радионуклида. Релевантность полученных результатов устанавливалась на основе определения статистической значимости полученных изменений запасов радионуклидов и их сопоставления с результатами расчетов темпов смыва почвы по математическим эрозионным моделям.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследований выбран распаханый водосбор площадью 0.25 км², который располагается в южной части Тульской области (рис. 1а) в бассейне р. Локны — левого притока р. Плавы. Основную часть водосбора (0.23 км²), в пределах которой проводился отбор проб, занимают пологие распахиваемые междуречные склоны крутизной от 1° до 7°. Остальная часть водосбора представлена крутыми (до 25°) задернованными бортами и пологонаклонным днищем сухой долины (рис. 1б).

Коренные породы — известняки каменноугольного возраста перекрываются толщей лёссовидных суглинков, являющихся почвообразующей породой [13]. Почвенный покров бассейна в пределах междуречных пространств представлен черноземами выщелоченными (Luvic Chernic Phaeozems) и оподзоленными (Luvic Greyzemic Chernic Phaeozems) [58]).

В целом для правобережной части бассейна р. Локна, где расположен исследуемый водосбор, характерен пологоволнистый возвышенный равнинный рельеф с сильным эрозионным расчленением — до нескольких десятков метров. Склоны междуречий распахиваются практически до бровок долин эрозионной сети более двух столетий [8]. Большая часть поверхности пашни характеризуется крутизной более 2°, что является достаточным для развития смыва [4, 15].

По данным метеостанции г. Плавска среднегодовое количество осадков составляет около 650 мм. С начала 1990-х гг. для европейской территории России отмечается отчетливая тенденция повышения средних температур в зимнее время и снижения талого стока вплоть до полного исчезновения в

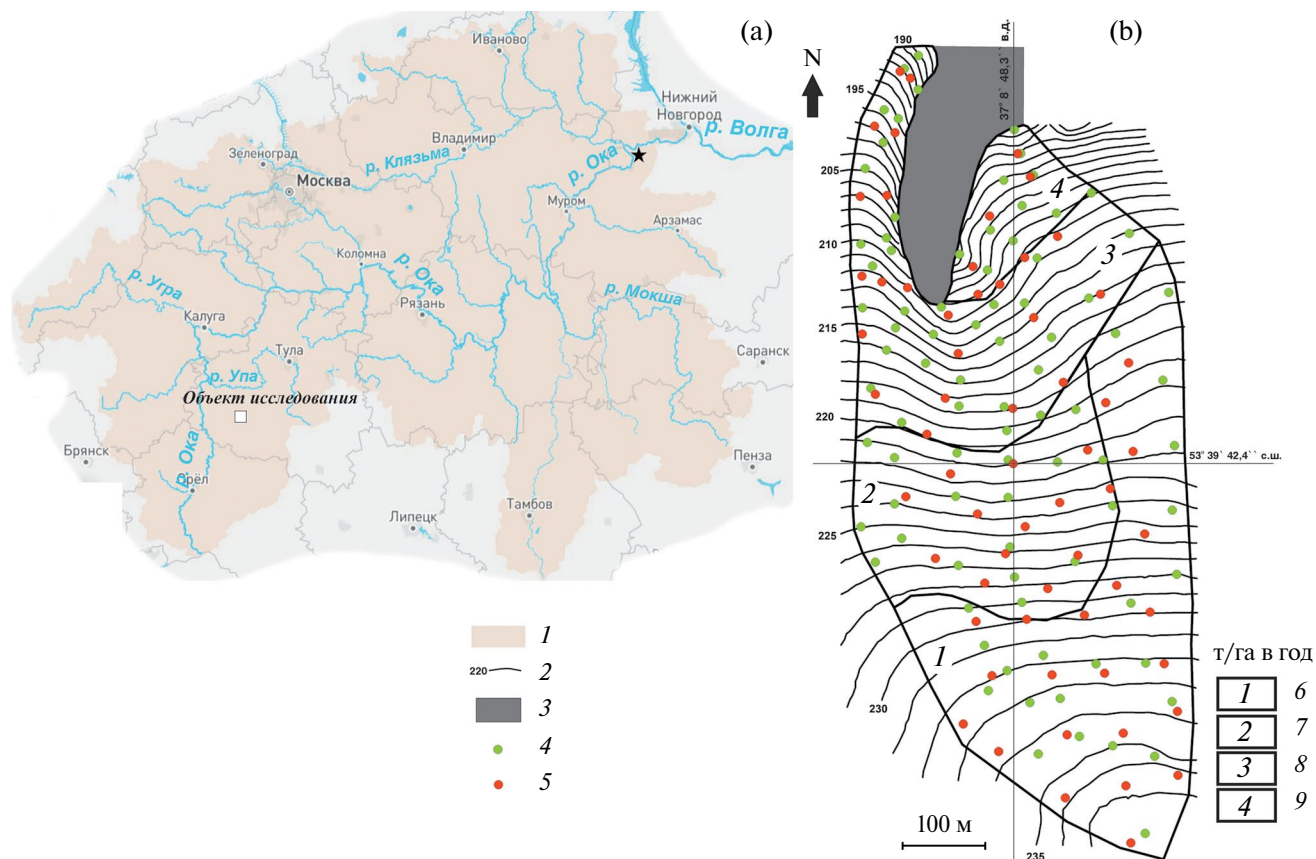


Рис. 1. Расположение объекта исследования (а): 1 – территория бассейна р. Оки [57]; схема отбора проб (б). 2 – абсолютная высота, м; 3 – задернованные борта и днище балки; 4 – точки отбора проб в 1997 г. [24]; 5 – точки отбора проб в 2023 г.; зоны с различной интенсивностью смыва, рассчитанного с помощью USLE [7]: 6 – 0–5; 7 – 5–10; 8 – 10–15; 9 – 15–20 т/га в год.

отдельные годы [2] вследствие уменьшения глубины промерзания почвы и сокращения поверхностного стока воды в период снеготаяния из-за высокой инфильтрационной способности почвы.

Исследуемый водосбор является частью балочной системы Лапки, расположенной в осевой части наиболее загрязненного чернобыльскими выпадениями Плавского радиоактивного пятна [1]. Высокий уровень содержания ^{137}Cs в почве определяет значительный интерес этой территории для исследования процессов послечернобыльской трансформации загрязнения речных бассейнов.

Водосбор Лапки ранее был детально изучен на предмет оценки темпов эрозионно-аккумулятивных процессов с применением ^{137}Cs чернобыльского происхождения в качестве радиоактивного трассера [25, 43, 54]. Высокая пространственная вариабельность чернобыльских выпадений предполагает выявление запасов ^{137}Cs на разных геоморфологических позициях с массовым отбором проб [18, 32].

Первичный отбор интегральных проб почвы в 1997 г. производился по равномерной нерегулярной

сетке с использованием цилиндрического стального пробоотборника с внутренним диаметром 6,8–8 см [25]. В 2023 г. был проведен повторный пробоотбор также по равномерной сети точек с использованием интегрального пробоотборника Eijkelkamp с внутренним диаметром 7 см. Пространственное совпадение положения точек отбора не выдерживалось, поскольку предполагалось сопоставление осредненных значений запасов в пределах произвольно заданных полигонов. Глубина пробоотбора составляла минимум 40 см (в отдельных случаях до 70 см), что признавалось достаточным для оценки суммарных запасов ^{137}Cs в пахотном горизонте даже для намытых почв на участках предполагаемой аккумуляции, расположенных внутри пашни. Объем полученных выборок составил 87 проб для 1997 г. и 62 пробы для 2023 г. Положение точек отбора фиксировалось с помощью геодезических GPS-приемников.

После отбора пробы были доставлены в лабораторию, где след за взвешиванием, просушиванием и повторным взвешиванием для определения влажности почвы и расчета ее плотности

были гомогенизированы и помещены в емкости заданной цилиндрической формы для проведения гамма-спектрометрических измерений. В 2023 г. измерения содержания ¹³⁷Cs были выполнены с использованием гамма-спектрометра с детектором из особо чистого германия (ОЧГ) производства компании ORTEC (США) с погрешностью, не превышающей 5%, что является близким показателям измерений, проводимых в конце 1990-х г. [25]. В целях корректного сопоставления выборок все показатели активности были пересчитаны на момент выпадения в апреле–мае 1986 г. При периоде полураспада ¹³⁷Cs в 30.2 лет к 1997 г. запасы радионуклидов сократились в 1.3 раза, а к 2023 г. в 2.3 раза исключительно за счет радиоактивного распада. Для двух выборок были построены гистограммы распределения, квантиль–квантиль (КК) графики, проведены статистические U-тест Манна–Уитни, Т-тест Уэлча и тест Шапиро–Уилка, рассчитаны средние значения и коэффициенты вариации (CV).

Территория водосбора была разделена на зоны с различной интенсивностью расчетных величин темпов смыва почвы (рис. 1б), границы которых были выделены по результатам проведенной ранее оценки темпов смыва с использованием модели USLE [7]. Зоны 1 и 2 занимают верхние части междуречных склонов с небольшими уклонами и отсутствием расчленения. Рельеф зоны 3 характеризуется более сложным строением, крутизна склонов значительно варьирует, появляются слабо выраженные склоновые ложбины. В зоне 4

расположены устьевые части склоновых ложбин, хорошо выраженные в рельефе и концентрирующие сток воды и наносов. Единственным фактором, определяющим неравномерность проявления эрозионных процессов, выступал эрозионный потенциал рельефа – все остальные факторы, фигурирующие в уравнении, принимались в качестве констант. Последующая статистическая обработка полученных данных и их интерпретация производилась как для всей обрабатываемой части водосбора, так и по выделенным зонам (рис. 1б).

В настоящей работе оценка темпов потерь почвы и аккумуляции по относительным изменениям запасов ¹³⁷Cs выполнялась при помощи пропорциональной конверсионной модели эрозии [53]:

$$Y = 10 \frac{BdX}{100T},$$

где Y – средние темпы смыва, т/га в год; B – плотность почвы, кг/м³; d – глубина вспашки, м; X – относительное изменение запасов ¹³⁷Cs, %; T – время с момента выпадения радионуклидов, лет. При расчетах принимались следующие значения: $B = 1200$ кг/м³; $d = 0.2$ м; $T = 26$ лет (1997–2023 гг.)

Относительное изменение запасов определялось согласно следующему уравнению:

$$X = \frac{Q_{2023} - Q_{1997}}{Q_{1997}} 100,$$

где Q_i – среднее значение запасов ¹³⁷Cs в пахотном горизонте, оцененных по сети точек в пределах зоны с предполагаемыми темпами смыва (рис. 1б), в соответствующем году, кБк/м².

Таблица 1. Статистические показатели запасов ¹³⁷Cs в пахотном горизонте для выделенных зон (рис. 1) и для водосбора в целом

Зона	Год	Число проб	Среднее, кБк/м ²	Значимость (p-value) по тесту Шапиро–Уилка	CV, %	Изменение средних запасов, кБк/м ²	Значимость (p-value)
1	1997	22	510.2	0.2932	17.8	–21.9	0.4684*
	2023	22	488.3	0.2629	21.9		
2	1997	19	451.5	0.09902	18.4	–34.1	0.3745*
	2023	13	417.4	0.6833	28.0		
3	1997	36	489.3	0.00005	22.6	–87	0.002617**
	2023	22	402.3	0.005135	42.2		
4	1997	10	502.4	0.2131	29.6	–142.5	0.07751*
	2023	5	359.9	0.2058	34.0		
Весь водосбор	1997	87	487.8	0.00001	21.7	–55.2	0.00682**
	2023	62	432.6	0.06117	32.3		

* По результатам Т-теста Уэлча.
** По результатам U-теста Манна–Уитни.

Полученные с помощью конверсионной модели оценки темпов перераспределения наносов сопоставлялись с результатами математического моделирования эрозии в пределах выделенных зон [7, 8].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Распределения запасов ^{137}Cs в выборках 1997 и 2023 гг. (табл. 1) представлены на рис. 2а, 2б. С целью определения их характера распределения был проведен тест на нормальность Шапиро–Уилка. Согласно результатам теста и принимая в качестве

пороговой величины уровень значимости 0.05, можно заключить, что данные 1997 г. по водосбору в целом, а также данные из зоны 3 за оба года характеризуются распределением отличным от нормального, данные по остальным зонам и общего водосбора 2023 г. — нормальным. Для площади всего водосбора это можно может быть проиллюстрировано КК-графиками. В конкретном случае прямая линия соответствует нормальному распределению (рис. 2с, 2д).

Сравнение выборок данных, характеризующихся нормальным распределением, с использованием

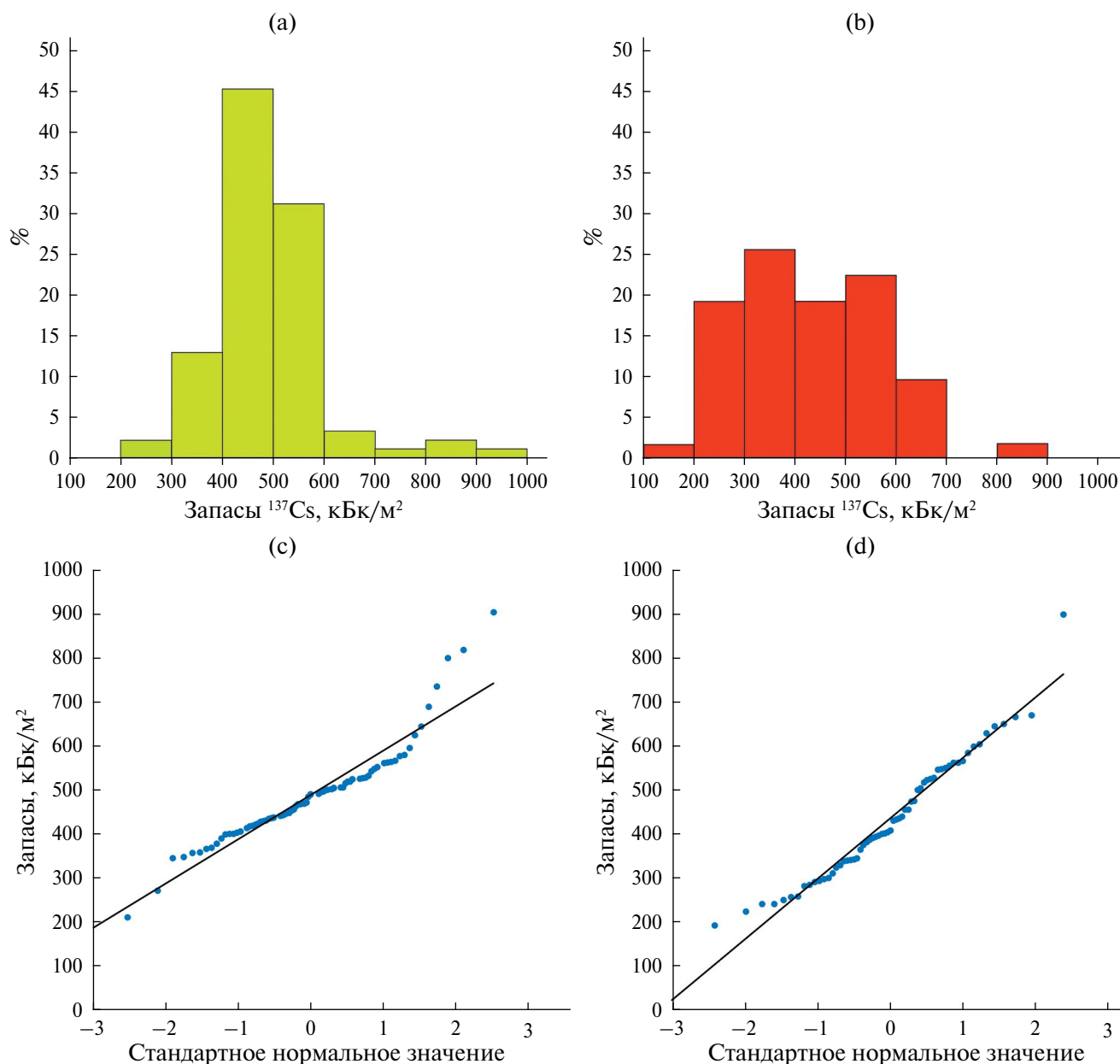


Рис. 2. Гистограммы распределения запасов изотопа ^{137}Cs в пахотном горизонте на склонах в 1997 г. (а) и в 2023 г. (б); КК-графики по данным 1997 (с) и 2023 гг. (д).

Т-критерия Уэлча дали результаты с уровнем значимости выше порогового 0.05, что указывает на то, что нулевая гипотеза об идентичном распределении не может быть отвергнута, а различия между выборками данных по содержанию ¹³⁷Cs, полученных из зон 1, 2, 4 за 1997 и 2023 гг. нельзя считать статистически значимыми. Для выборок, характеризующихся распределением, отличным от нормального, проводился U-тест Манна–Уитни, согласно результатам которого, различия между выборками данных из водосбора в целом и зоны 3, можно считать статистически достоверными.

По сравнению с 1997 в 2023 гг. средняя величина запасов ¹³⁷Cs уменьшилась более, чем на 10%, при этом вариабельность значений возросла на треть. Произошедшая трансформация поля загрязнения характеризуется значительной пространственной неравномерностью. В наименьшей степени изменения произошли в границах зон 1 и 2, занимающих верхние части склонов, где интенсивность эрозионного смыва минимальна и не превышает 10 т/га в год по оценке авторов [7]. На более низких гипсометрических позициях (зоны 3, 4), где происходит рост общей длины склонов и крутизны в их нижней части, т.е. увеличение эрозионного потенциала рельефа, а также концентрация склонового стока по серии ложбин (в особенности в зоне 3), получены значительно большие изменения запасов. Стоит отметить, что оценка изменений запасов ¹³⁷Cs для зоны 4, в силу малого объема выборки 2023 г., является наименее надежной. Однако в зоне 3, где в 2023 г. было отобрано самое большое количество проб, наблюдается как сильное сокращение запасов (–17.8%), так и рост CV с 22.6 до 42.2%.

Использование пропорциональной модели при классическом способе оценки относительного изменения запасов ¹³⁷Cs путем их сопоставления на

заданной позиции и на опорной водораздельной площадке дало значение среднего темпа смыва для исследуемого водосбора за период около 10 лет после аварии равное 20.2 т/га в год [7]. В течение первых десятилетий XXI в., с учетом имеющей место тенденции сокращения талого стока [2] и сравнительной редкости выпадения в Плавском районе экстремальных ливневых осадков, способных спровоцировать значительный смыв почвы [6], темпы эрозии ожидалось ниже, чем в период 1986–1997 гг. Оценки для периода 1997–2023 гг., полученные с использованием пропорциональной конверсионной модели, близки к результатам расчетов по эрозионным моделям (табл. 2) или превышают их, как показывают экспериментальные данные, это типично для конверсионных моделей [56].

ОБСУЖДЕНИЕ

Оценки средних темпов смыва с использованием конверсионной модели имеют существенные ограничения. Конверсионные модели рассчитаны на оценку только плоскостного смыва. Микрорельеф обрабатываемых склонов междуречий, выражающийся, в частности, в наличии морфологически обособленных склоновых ложбин, способен контролировать темпы и пространственное проявление эрозионно-аккумулятивных процессов, концентрируя склоновой сток. В таких условиях происходит преобразование гидравлических характеристик потока, и использование моделей, оценивающих плоскостной смыв, не совсем корректно. В границах выделенных полигонов морфологически выраженные ложбины присутствуют только в зоне 4. Малое количество точек отбора в 1997 г. не позволяет в достаточной мере охарактеризовать пространственную неоднородность запасов ¹³⁷Cs, приуроченных к различным элементам рельефа. Поэтому невозможно провести

Таблица 2. Среднегодовые темпы смыва почвы за период 1997–2023 гг. на пахотных склонах по выделенным зонам (рис. 1) и в целом для водосбора, установленные на основе пропорциональной конверсионной модели и с использованием моделей эрозии USLE и WaTEM/SEDEM

Зона	Оценка интенсивности смыва, т/га в год		
	пропорциональная конверсионная модель	USLE*	WaTEM/SEDEM**
1	4.0	0–5	4.8
2	7	5–10	5.6
3	16.4	10–15	11
4	26.2	15–20	34.7
Весь водосбор	11.7	6.4	8.9

* По [7].

** По [8].

корректное сопоставление состояний загрязнения на разных временных этапах, даже если бы набор данных 2023 г. был более обширным. Также для рассматриваемого периода из оценки были исключены подножия пахотных склонов, где в узкой зоне перед нижней границей пашни происходит аккумуляция. Этот процесс особенно интенсивен при наличии морфологически выраженного вала — напаша, формируемой в результате совместного действия сельскохозяйственной техники (так называемая механическая эрозия) и переотложения продуктов смыва. Эффект от механической эрозии проявляется только в границах полей и выражается в постепенном перемешивании и перемещении материала к подножию склона, а также к нивелированию контрастного микрорельефа в случае его наличия. При этом не происходит выноса материала за пределы распаханых склонов.

Потери почвенного материала также происходят при уборке урожая корнеплодов. Проблема количественной оценки этого процесса остается плохо освещенной как в отечественной, так и в мировой литературе. Одно из немногих детальных исследований проводилось в конце 1980-х гг. [3]. Оценка масштабов выноса мелкозема с урожаем картофеля и корнеплодов путем отмывки проб картофеля и сахарной свеклы, взятых непосредственно на поле в Калужской области, дала значения 2.5 и 2.3 т/га за один сбор урожая соответственно. В обобщении опыта европейских исследований [42] оценки выноса колеблются от 2.7 до 10 т/га за один сбор урожая, отмечается слабый тренд уменьшения потерь почвы с севера на юг в связи с увеличением сухости почвы. По другим данным [45], потери почвы при уборке корнеплодов составляют не менее 1.5 т/га в год, но могут превышать и 10 т/га в год. Российские и зарубежные оценки достаточно близки, но столь существенный разброс значений заставляет предположить, что объем отчуждаемой с урожаем почвы в основном определяется местными условиями: гранулометрическим составом, влажностью, липкостью почвы во время уборки. Поэтому для понимания индивидуального вклада водной и механической эрозии, а также потерь почвы при уборке корнеплодов необходимы дополнительные исследования. Для оценки вклада механической эрозии в перераспределение наносов необходимо обладать информацией о частоте и направлении обработки почвы, а также об особенностях плугов, используемых при вспашке [28]. Отчуждение почвы с урожаем можно оценить имея, как минимум, данные о ротации культур на исследуемом участке. В общей структуре севооборотов Тульской области в 2000–2018 гг. доля картофеля не превышала 5%, а сахарной свеклы — 1.2% [16]. На основании всех приведенных данных предполагаем, что для исследованного водосбора отчуждение почвы с урожаем

корнеплодов не вносит существенного вклада в эрозионные потери.

Деление водосбора, согласно результатам математического моделирования, на четыре зоны по изменениям интенсивности смыва показало как закономерное относительное сокращение запасов ^{137}Cs при общем движении вниз по склону, так и сопоставимые величины темпов смыва в каждой зоне, полученные различными методами. Оценки темпов смыва на основе изменений запасов ^{137}Cs в пределах компактных ключевых водосборов на основе повторного пробоотбора почв успешно проводились в разных странах (табл. 3). В основном для исследований выбирались участки меньшей площади, которые располагались или на территориях только с глобальными выпадениями ^{137}Cs [24, 34, 49] или с сопоставимыми по величине уровнями глобальных и чернобыльских выпадений ^{137}Cs [46]. И в том, и в другом случаях это создавало проблемы при пересчете изменений запасов ^{137}Cs в темпы смыва/аккумуляции на основе конверсионных моделей. В частности, это связано с тем, что глобальный цезий выпадал из атмосферы в период с 1954 г. до начала 1980 г. с несколькими максимумами (1959, 1963 гг.). Поэтому возникала необходимость учитывать выпадения ^{137}Cs на уже трансформированное в связи с развитием водной и механической эрозии поле загрязнения. В настоящем случае уровни загрязнения территории ^{137}Cs чернобыльского происхождения, выпадение которого можно считать практически одномоментным, на два порядка превышали предшествующие выпадения ^{137}Cs глобального происхождения. Вследствие этого необходимость учитывать его предшествующее перераспределение при пересчете от содержания ^{137}Cs к темпам смыва фактически отсутствует.

Метод повторного пробоотбора почвы для оценки изменений содержания ^{137}Cs не позволяет фиксировать небольшие изменения темпов смыва [46]. Период в 26 лет (1997–2023 гг.), прошедший между отборами проб, оказался достаточным для проявления воздействия эрозионных процессов на пространственную картину загрязнения, что также связано с достаточно высокой энергией рельефа исследуемого водосбора, обусловленной большим для пахотных склонов перепадом высот. Первый геоморфологически обоснованный долгосрочный прогноз воздействия эрозионно-аккумулятивных процессов на трансформацию поля радиоактивного загрязнения почвенного покрова был сделан для бассейна р. Локны в результате работ, проведенных в 1993 г. — спустя 7 лет после аварии [11]. Обработываемые склоны междуречий рассматривались в качестве зон смыва материала, в результате которого должно было происходить постепенное сокращение плотности радиоактивного загрязнения. Концентрация радионуклидов в пахотном горизонте с течением времени уменьшалась, так как

Таблица 3. Параметры некоторых малых водосборов, расположенных в различных регионах мира, выявленные с применением методики повторного пробоотбора ¹³⁷Cs темпы смыва

Параметр	Исследование				
	[24]	[49]	[34]	[46]	настоящая работа
Страна	США	Канада	Канада	Италия	Россия
Год отбора проб	1974, 1998	1990, 2005	1971, 1985	1999, 2013	1997, 2023
Площадь, га	6.03	4.3	1.7	1.38	23
Землепользование	Пашня	Пашня, разведение овощей	Пашня	Естественная растительность, посадки эвкалипта	Пашня
Средние запасы ¹³⁷ Cs, кБк/м ² *	1.9	1.7	2	1.8	175.6
Средние темпы эрозии (потери почвы), т/га в год	19	13.6	6	12.6	11.7

* На момент проведения повторного пробоотбора.

одновременно со смывом верхней части почвенного профиля при фиксированной глубине механической обработки происходила постоянная подпашка относительно чистого материала. Прогнозные оценки изменений относительной концентрации чернобыльского ¹³⁷Cs в пахотном слое с учетом скорости его распада и интенсивности смыва были получены при помощи метода определения интенсивности эрозии почв по изменениям концентрации радионуклида, разработанного для ¹³⁷Cs глобальных выпадений [12]. При прогнозе учитывалось, что средняя относительная ошибка измерений концентрации изотопа в образце равна 10%. Был сделан вывод, что для склонов с интенсивностью смыва 5–10 т/га в год повторный отбор проб почвы для оценки изменений запасов ¹³⁷Cs целесообразно проводить через 30–50 лет. В связи с этим в первое десятилетие после аварии значимых изменений запасов ¹³⁷Cs, связанных с эрозионной деятельностью, не ожидалось [43]. Следует отметить, что полученные результаты в целом подтверждают данный прогноз, так как статистически значимые различия в содержании ¹³⁷Cs выявлены только для зоны 3, где темпы смыва превышали 10 т/га в год.

Проверка эффективности применения конверсионной модели путем сравнения с результатами эрозионного моделирования имеет существенное ограничение, поскольку сопоставлялись несколько разные по своей сути величины. Темпы перераспределения наносов, полученные при помощи конверсионной модели, подразумевают комплексный процесс перемещения вещества под воздействием не только водной, но и механической эрозии, что также находит отражение в изменениях

запасов ¹³⁷Cs. В использованных моделях данный процесс не учитывается, хотя в перспективе его вклад может быть включен в расчет [49]. Любой дополнительный критерий проверки, доступный в каждом конкретном случае, приветствуется [52].

Удельная величина среднесуточных потерь почвы, т.е. интенсивность смыва в т/га в год – это удобный показатель, позволяющий сравнивать объекты разной площади. Однако он не отражает реальные ежегодные эрозионные потери, особенно при исследованиях с относительно коротким временным лагом в пределах первых десятилетий. Вследствие чрезвычайной пространственно-временной неравномерности проявлений эрозионно-аккумулятивных процессов, особенно при ливневой эрозии, наибольшие объемы перемещения почвы происходят в результате выпадения ливневой малой обеспеченности, площадь покрытия которых может быть небольшой [20]. Эти ливни могут не фиксироваться даже близлежащими метеостанциями и не попадать в ряды метеоданных, используемых для расчета эрозионного потенциала осадков при математическом моделировании.

Описанный в статье подход, основанный на оценках темпов эрозии почв за сравнительно длительный интервал времени на основе определения изменений содержания ¹³⁷Cs чернобыльского происхождения, впервые использован на территориях со значительным радиоактивным загрязнением. Помимо собственно оценок смыва, он представляет интерес и для изучения трансформации поля радиоактивного загрязнения в пределах обрабатываемых междуречий. Именно продукты смыва с пашен являются основными источниками

поступления наносов с повышенным содержанием радионуклидов в нижележащие звенья флювиальной сети. В результате формируются участки аккумуляции с повышенными запасами радионуклидов [27]. К сожалению, ранее исследованных объектов со столь плотной сетью отбора проб на содержание ^{137}Cs насчитывается мало. Проведение аналогичных исследований в пределах компактных пахотных водосборов с повторным отбором проб может использоваться в качестве альтернативы гораздо более дорогостоящему и трудозатратному инструментальному мониторингу эрозионно-аккумулятивных процессов, который необходим в связи с климатическими изменениями и изменениями севооборотов. Пригодными для организации подобных исследований являются территории европейской части России, где уровни загрязнения почв после аварии на Чернобыльской АЭС более чем вдвое превышали их загрязнения ^{137}Cs глобального происхождения. Подобные территории имеются и в ряде европейских стран. Высокий уровень содержания ^{137}Cs выступает в качестве преимущества, поскольку снижает временные затраты на проведение аналитических работ и дает возможность проводить анализ трансформации загрязнения с гораздо меньшим временным шагом, чем было описано в настоящем исследовании. Частый повторный пробоотбор повышает вероятность получения чрезвычайно важных данных о вкладе единичных эрозионных событий в суммарные среднегодовые потери почвы. Вместе с этим наличие непрерывного ряда даже в условиях значимого проявления эрозионных процессов на малых отрезках времени (1–2 года) может послужить в качестве холостого контрольного опыта, повышающего достоверность оценки средних многолетних темпов смыва или наоборот показывающего ее нерелевантность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование является первым опытом применения метода повторного пробоотбора с использованием ^{137}Cs чернобыльского происхождения для оценки интенсивности эрозионно-аккумулятивных процессов на территории Центральной России. Полученные результаты могут быть использованы для верификации имеющихся моделей эрозии. Установлено, что несмотря на наблюдаемую тенденцию к сокращению талого стока, на локальном уровне темпы смыва значимы. В перспективе описанная практика может быть распространена на серию склоновых водосборов с различными геоморфологическими и метеорологическими условиями, строением почвенного покрова и системой землепользования. Для получения надежных оценок требуется предварительное проведение крупномасштабной

геоморфологической и почвенной съемки. На каждый из периодов между проведением пробоотбора крайне желателен непрерывный ряд метеоданных, получаемых в непосредственной близости от исследуемого объекта, который мог бы надежно фиксировать частоту и интенсивность выпадения экстремальных дождевых осадков. Безусловным достоинством потенциального участка будет служить наличие локального накопителя стока наносов, например, в виде искусственного водоема, который позволит оценивать баланс наносов для сегмента эрозионной сети, куда поступает смытый со склонов почвенный материал. Вместе с этим такая система мониторинга с использованием метода повторного пробоотбора на территориях, подверженных интенсивным чернобыльским выпадениям, позволит отслеживать трансформацию радиоактивного загрязнения сельскохозяйственных угодий и оценивать потенциальные радиоэкологические риски, связанные с латеральной миграцией техногенных радионуклидов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках реализации проекта РНФ № 23-77-10045.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас радиоактивного загрязнения Европейской части России, Белоруссии и Украины / Под ред. Израэля Ю.А. М.: Росгидромет, Роскартография, 1998 142 С.
2. 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>
3. Белоцерковский М.Ю., Ларионов Г.А. Отчуждение мелкозема с урожаем картофеля и корнеплодов — составная часть потерь почвы // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5, география. 1988. № 4. С. 49–54.
4. Брауде И.Д. Природа пятнистости пахотных почв на склонах и мелиорация // Почвоведение. 1991. № 12. С. 89–97.

5. Жидкин А.П., Комиссаров М.А., Шамигурина Е.Н., Мищенко А.В. Эрозия почв на Среднерусской возвышенности (обзор) // Почвоведение. 2023. № 2. С. 259–272.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X22600901>
6. 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. 2022. Вып. 22. С. 66–97.
7. Иванова Н.Н., Голосов В.Н., Маркелов М.В. Сопоставление методов оценки интенсивности эрозионно-аккумулятивных процессов на обрабатываемых склонах // Почвоведение. 2000. № 7. С. 898–906.
8. Иванова Н.Н., Фомичева Д.В., Рухович Д.И., Шамигурина Е.Н. Ретроспективный анализ истории земледельческого освоения и оценка темпов эрозии почв в бассейне р. Локна, Тульская область // Почвоведение. 2023. № 7. С. 872–886.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X22601475>
9. Квасникова Е.В., Стукин Е.Д., Голосов В.Н. Неравномерность загрязнения цезием-137 территорий, расположенных на большом расстоянии от Чернобыльской АЭС // Метеорология и гидрология. 1999. № 2. С. 5–11.
10. Литвин Л.Ф. География эрозии почв сельскохозяйственных земель России. М.: Академкнига. 2002. 255 С.
11. 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. Т. 23. № 3. С. 314–320.
12. Острова И.В., Силантьев А.Н., Литвин Л.Ф., Голосов В.Н., Шкуратова И.Г. Оценка интенсивности эрозионно-аккумулятивных процессов по содержанию в почве цезия-137 // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5, география. 1990. № 5. С. 79–85.
13. Ратников А.И. Геоморфологические и агропочвенные районы Тульской области // Почвенное районирование СССР. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1960. С. 92–115.
14. Силантьев А.Н., Шкуратова И.Г., Хацкевич Р.Н. Пространственное распределение цезия-137 в почвах европейской части СССР // Почвоведение. 1978. № 4. С. 47–48.
15. Соболев С.С. Развитие эрозионных процессов на территории Европейской части СССР и борьба с ними. М., 1948. Т. I. 307 с.
16. Тульский статистический ежегодник статистический сборник // Федеральная служба государственной статистики, Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Тульской области. Тула: Тулстат, 2022. С. 174.
17. Уоллинг Д., Голосов В.Н., Квасникова Е., Вандеркастель К. Экологические проблемы радионуклидного загрязнения малых водосборных бассейнов // Почвоведение. 2000. № 7. С. 888–897.
18. 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.
19. Arata L., Meusburger K., Bürge A., Zehringer M., Ketterer M.E., Mabit L., Alewell C. Decision support for the selection of reference sites using ¹³⁷Cs as a soil erosion tracer // Soil. 2017. V. 3. № 3. P. 113–122.
<https://doi.org/10.5194/soil-3-113-2017>
20. Belyaev V.R., Golosov V.N., Kislenko K.S., Kuznetsova J.S., Markelov M.V. Combining direct observations, modelling, and ¹³⁷Cs tracer for evaluating individual event contribution to long-term sediment budgets // Sediment Dynamics in Changing Environments. 2008. V. 325. P. 114–122.
21. Brazier R.E. Quantifying soil erosion by water in the UK: a review of monitoring and modelling approaches // Progress Phys. Geograph. 2004. V. 28. P. 340–365.
<https://doi.org/10.1191/0309133304pp415ra>
22. Ciszewski D., Grygar T.M. A review of flood-related storage and remobilization of heavy metal pollutants in river systems // Water Air Soil Poll. 2016 V. 227. P. 1–19.
<https://doi.org/10.1007/s11270-016-2934-8>
23. De Jong E., Kachanoski R.G. The importance of erosion in the carbon balance of prairie soils // Can. J. Soil Sci. 1988. V. 68. P. 111–119.
24. Fornes W.L., Whiting P.J., Wilson C.G., Matisoff G. Caesium-137-derived erosion rates in an agricultural setting: the effects of model assumptions and management practices // Earth Surface Processes and Landforms. 2005. V. 30. № 9. P. 1181–1189.
<https://doi.org/10.1002/esp.1269>
25. Golosov V.N., Walling D.E., Panin A.V., Stukin E.D., Kvasnikova E.V., Ivanova N.N. The spatial variability of Chernobyl-derived ¹³⁷Cs inventories in a small agricultural drainage basin in Central Russia // Appl. Radiation and Isotopes. 1999. V. 51. P. 341–352.
[https://doi.org/10.1016/S0969-8043\(99\)00050-0](https://doi.org/10.1016/S0969-8043(99)00050-0)
26. Golosov V.N., Walling D.E., Stukin E.D., Nikolaev A.N., Kvasnikova E.V., Panin A.V. Application of a field-portable scintillation detector for studying the distribution of Cs-137 inventories in a small basin in Central Russia // J. Environ. Radioactivity. 2000. V. 48. № 4. P. 79–94.
27. Golosov V., Ivanov M. 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. Singapore: Springer, 2020. P. 195–226.
https://doi.org/10.1007/978-981-15-3568-0_4

28. Govers G., Vandaele K., Desmet P., Poesen J., Bunte K. The role of tillage in soil redistribution on hillslopes // Eur. J. Soil Scie. 1994. V. 45. P. 469–478.
29. Horowitz A.J. A Primer on Sediment-Trace Element Chemistry. Lewis: Chelsea, 1991. 134 p.
30. Kachanoski R.G., de Jong E. Predicting the temporal relationship between soil cesium-137 and erosion rate // J. Environ. Quality. 1984. V. 13. № 2. P. 301–304. <https://doi.org/10.2134/jeq1984.00472425001300020025x>
31. Konoplev A.V., Bobovnikova Ts.I. Comparative analysis of chemical forms of long-lived radionuclides and their migration and transformation in the environment following the Kyshtym and Chernobyl accidents // Proceedings of Seminar on Comparative Assessment of the Environmental Impact of Radionuclides Released during Three Major Nuclear Accidents. Luxembourg, 1–5 October 1990. 1990. V. 1. P. 371–396.
32. Kvasnikova E.V., Stukin E.D., Golosov V.N., Ivanova N.N., Panin A.V. Caesium-137 behaviour in small agricultural catchments on the area of the Chernobyl contamination // Czechoslovak J. Phys. 1999. V. 49. Suppl 1. P. 181–187. <https://doi.org/10.1007/s10582-999-0025-4>
33. Lal R. Soil degradation by erosion // Land Degradation Development. 2001. V. 12. № 6. P. 519–539. <https://doi.org/10.1002/ldr.472>
34. Li S., Lobb D.A., Kachanoski R.G., McConkey B.G. Comparing the use of the traditional and repeated-sampling-approach of the ¹³⁷Cs technique in soil erosion estimation // Geoderma. 2011. V. 160. № 3–4. P. 324–335. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.09.029>
35. Litvin L.F., Zorina Y.F., Sidorchuk A.Y., Chernov A.V., Golosov V.N. Erosion and sedimentation on the Russian Plain, part 1: contemporary processes // Hydrological Processes. 2003. V. 17. P. 3335–3346. <https://doi.org/10.1002/hyp.1390>
36. Lobb D.A., Kachanoski R.G. Modelling tillage erosion in the topographically complex landscapes of south-western Ontario, Canada // Soil Till. Res. 1999. V. 51. P. 261–277. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00042-2](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00042-2)
37. Loughran R.J., Balog R.M. Re-sampling for Soil-caesium-137 to Assess Soil Losses after a 19-year Interval in a Hunter Valley Vineyard, New South Wales, Australia // Geograph. Res. 2006. V. 44. № 1. P. 77–86. <https://doi.org/10.1111/j.1745-5871.2006.00361.x>
38. McHenry J.R., Bubbenzer G.D. Field Erosion Estimated from Cs Activity Measurements // Transactions of the ASAE. 1985. V. 28. № 2. P. 480–483.
39. Moustakim M., Benmansour M., Zouagui A., Nour A., Benkdad A., Damnati B. Use of caesium-137 re-sampling and excess lead-210 techniques to assess changes in soil redistribution rates within an agricultural field in Nakhla watershed // J. African Earth Sci. 2019. V. 156. P. 158–167. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.04.017>
40. Owens P.N. Soil erosion and sediment dynamics in the Anthropocene: a review of human impacts during a period of rapid global environmental change // J. Soils Sediments. 2020. V. 20. P. 4115–4143. <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02815-9>
41. Owens P.N., Walling D.E. Spatial variability of caesium-137 inventories at reference sites. An example from two contrasting sites in England and Zimbabwe // Appl. Radiation Isotopes. 1996. V. 47. P. 699–707. [https://doi.org/10.1016/0969-8043\(96\)00015-2](https://doi.org/10.1016/0969-8043(96)00015-2)
42. Panagos P., Borrelli P., Poesen J. Soil loss due to crop harvesting in the European Union: A first estimation of an underrated geomorphic process // Sci. Total Environ. 2019. V. 664. P. 487–498. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.009>
43. Panin A.V., Walling D.E., Golosov V.N. The role of soil erosion and fluvial processes in the post-fallout redistribution of Chernobyl-derived caesium-137: a case study of the Lapki catchment, Central Russia // Geomorphology. 2001. V. 40. № 3–4. P. 185–204. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00043-5](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00043-5)
44. Parsons A.J., Foster I.D. What can we learn about soil erosion from the use of ¹³⁷Cs? // Earth-Science Reviews. 2011. V. 108. № 1–2. P. 101–113. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.06.004>
45. Poesen J. Soil erosion in the Anthropocene: Research needs // Earth Surface Processes Landforms. 2018. V. 43. № 1. P. 64–84. <https://doi.org/10.1002/esp.4250>
46. Porto P., Walling D.E., Alewell C., Callegari G., Mabit L., Mallimo N., Meusburger K., Zehring M. Use of a ¹³⁷Cs re-sampling technique to investigate temporal changes in soil erosion and sediment mobilisation for a small forested catchment in southern Italy // J. Environ. Radioactivity. 2014. V. 138. P. 137–148. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.08.007>
47. Porto P., Walling D.E., Cogliandro V., Callegari G. Exploring the potential for using ²¹⁰Pb_{ex} measurements within a re-sampling approach to document recent changes in soil redistribution rates within a small catchment in southern Italy // J. Environ. Radioactivity. 2016. V. 164. P. 158–168. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.06.026>
48. Sutherland R.A. Caesium-137 soil sampling and inventory variability in reference locations: A literature survey // Hydrological Processes. 1996. V. 10. № 1. P. 43–53. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199601\)10:1<43::AID-HYP298>3.0.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199601)10:1<43::AID-HYP298>3.0.CO;2-X)
49. Tiessen K.H.D., Li S., Lobb D.A., Mehuys G.R., Rees H.W., Chow T.L. Using repeated measurements of ¹³⁷Cs and modelling to identify spatial patterns of tillage and water erosion within potato production in Atlantic Canada // Geoderma. 2009. V. 153. № 1–2. P. 104–118. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.07.013>
50. Tsybarovich P., Kust G., Kumani M., Golosov V., Andreeva O. Soil erosion: An important indicator for the

- assessment of land degradation neutrality in Russia // *Int. Soil And Water Conservation Res.* 2020. V. 8. № 4. P. 418–429.
<https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.06.002>
51. *Verstraeten G., Poesen J.* Estimating trap efficiency of small reservoirs and ponds: methods and implications for the assessment of sediment yield // *Progress Phys. Geograph.* 2000. V. 24. № 2. P. 219–251.
<https://doi.org/10.1177/030913330002400204>
 52. *Walling D.E., Quine T.A.* Calibration of caesium-137 measurements to provide quantitative erosion rate data // *Land Degradation Development.* 1990. V. 2. №. 3. P. 161–175.
<https://doi.org/10.1002/ldr.3400020302>
 53. *Walling D.E., He Q.* Improved models for estimating soil erosion rates from cesium-137 measurements // *J. Environ. Quality.* 1999 V. 28. P. 611–622.
<https://doi.org/10.2134/jeq1999.00472425002800020027x>
 54. *Walling D.E., Golosov V.N., Panin A.V., He Q.* Use of radiocaesium to investigate erosion and sedimentation in areas with high levels of chernobyl fallout // *Tracers in Geomorphology* / Ed. Foster I.D.L. Chichester: Wiley & Sons. 2000. P. 183–200.
 55. *Walling D.E., Owens P.N., Carter J., Leeks G.J.L., Lewis S., Meharg A.A., Wright J.* Storage of sediment-associated nutrients and contaminants in river channel and floodplain systems // *Appl. Geochem.* 2003. V. 18. P. 195–220.
[https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00121-X](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00121-X)
 56. *Zhang X.J.* Evaluating and improving ^{137}Cs technology for estimating soil erosion using soil loss data measured during 1954–2015 // *Earth-Science Rev.* 2023. V. 247. 104619.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104619>
 57. <https://oka.miigaik.ru/>
 58. <https://wrb.isric.org/documents/>

Assessment of Changes in Chernobyl Contamination and Erosion Rates Within Cultivated Slopes Using Soil Re-Sampling Method

**M. M. Ivanov^{1, 2, *}, N. N. Ivanova², V. N. Golosov^{1, 2},
A. A. Usacheva^{1, 3}, G. A. Smolina⁴, and D. V. Fomicheva⁵**

¹*Institute of Geography of RAS, Moscow, 119017 Russia*

²*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

³*IGEM of RAS, Moscow, 119017 Russia*

⁴*Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, 127434 Russia*

⁵*Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, 119017 Russia*

*e-mail: ivanovm@bk.ru

The transformation of radioactive contamination of agricultural lands with the ^{137}Cs isotope is one of the evidences of soil erosion. Quantitative assessment of changes in radionuclide inventories and the corresponding rates of soil loss can be carried out by repeated sampling of integral soil samples at key sites over long time intervals. Due to the high labor intensity, such studies are relatively few and have not previously been conducted in the zone of intense Chernobyl contamination in Central Russia. The method of repeated sampling (re-sampling) was used in 2023 within the plowed slopes of a small catchment area in the southern part of the Tula region, 26 years after a similar procedure was carried out in 1997. The changes in ^{137}Cs inventories that occurred during this period turned out to be statistically significant, with an average reduction of more than 10%. According to a proportional erosion conversion model using relative changes in ^{137}Cs inventories, the average annual flushing rate was estimated at $11.7 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$. Such values of soil losses are generally comparable with the previously published results of independent mathematical modeling for this area. Thus, the use of the re-sampling method, including at new sites, is promising for assessing the rate of soil loss, and in addition makes it possible to verify existing erosion models and track long-term trends in the spatial transformation of radioactive contamination.

Keywords: erosion, radiocesium method, radionuclides, Chernic Phaeozems