

УДК: 551.4.03:528.067.4

DOI: 10.35595/2414-9179-2024-2-30-263-281

Л. Н. Трофимец¹, Е. А. Паниди², А. В. Тарасов³, А. О. Баркалов⁴

ВОЗМОЖНОСТИ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОГО ПОДХОДА К ОЦЕНКЕ ПОТЕРЬ ПОЧВЫ ВСЛЕДСТВИЕ ВОДНОЙ ЭРОЗИИ НА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОЛЯХ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ РАДИОЦЕЗИЕМ (БАССЕЙН ВЕРХНЕЙ ОКИ)

АННОТАЦИЯ

В работе приводятся результаты изучения потерь почвы вследствие водной эрозии на участке сельскохозяйственного поля, расположенном на распаханном склоне южной экспозиции на экспериментальном участке, который находится на территории Орловского района Орловской области (в бассейне верхней Оки). В основу исследований положены авторские полевые данные. Использование спутникового снимка сверхвысокого разрешения, цифровой модели рельефа (ЦМР), по которой были рассчитаны морфометрические показатели рельефа (площадь сбора и профильная кривизна), большой объем данных интегрально отобранных проб почвы в слое 0–25 см (более 500), гамма-спектрометрический и агрохимический анализы проб почвы позволили разработать систему зависимостей для 11 расчетных участков. В качестве предикторов выступали площадь сбора и профильная кривизна. Участки отличаются по степени расчленения поверхности ложбинным комплексом, по уклонам поверхности. Для водораздельной поверхности предложен расчетный участок, границы которого ограничены значениями площади сбора 500 м². Маркером степени смытости почв выступает цезий-137. Большая вариабельность цезия-137 на экспериментальном участке обусловлена в т. ч. наличием на склоновой поверхности свально-развальных борозд. Построенная по разработанным уравнениям сеточная карта интенсивности смыва почвы показала, что интенсивность потерь почвы вследствие водной эрозии изменяется от 5 до 20 т/га/год. В пределах 11 расчетных участков наблюдается различие в площадях участков со смывом почвы большой интенсивности (значение 20 т/га/год и более). Предложенная в статье региональная методика оценки потерь почвы с использованием радионуклида цезия-137 и морфометрических показателей рельефа требует верификации независимым методом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цезий-137 чернобыльского происхождения, спутниковые снимки, площадь сбора, профильная кривизна, интенсивность смыва почвы, ГИС

¹ Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева, Институт естественных наук и биотехнологии, ул. Комсомольская, д. 95, Орел, Россия, 302026, *e-mail*: trofimec_l_n@mail.ru

² Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, кафедра картографии и геоинформатики, 10-я линия Васильевского острова, д. 33, Санкт-Петербург, Россия, 199178, *e-mail*: panidi@ya.ru, panidi@spbu.ru

³ Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева, Медицинский институт, кафедра внутренних болезней, ул. Комсомольская, д. 95, Орел, Россия, 302026, *e-mail*: arcorel@yandex.ru

⁴ Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева, Институт естественных наук и биотехнологии, ул. Комсомольская, д. 95, Орел, Россия, 302026, *e-mail*: 7oup@mail.ru

Lyubov N. Trofimetz¹, Evgeny A. Panidi², Arkady V. Tarasov³, Aleksandr O. Barkalov⁴

**POSSIBILITIES OF A DIFFERENTIATED APPROACH TO ASSESSMENT
OF WATER EROSION SOIL LOSS IN AGRICULTURAL FIELDS
CONTAMINATED WITH RADIOCAESIUM (UPPER OKA BASIN)**

ABSTRACT

The paper presents the results of studying the soil loss due to water erosion in an agricultural field located on the arable slope of the southern exposure at an experimental area located in the territory of the Oryol district of the Oryol Region (in the upper Oka basin). The research is based on the author's in situ data. The use of a very high resolution satellite imagery, a digital elevation model (DEM), which was used to calculate morphometric relief indicators (catchment area and profile curvature), a large amount of data of the integrally selected soil samples in a 0–25 cm layer (more than 500), gamma-spectrometric and agrochemical analysis of soil samples together allowed us to develop a system of dependencies for 11 estimated zones. The catchment area and profile curvature were used as predictors. The zones differ in the degree of dissection of the surface by the hollow complex and by the slopes of the surface. For the watershed surface, an estimated zone is proposed that bounds the area of 500 m² catchment area values. Caesium-137 acts as a marker of the degree of soil runoff. The high variability of caesium-137 in the experimental area is due, among other things, to the presence of pile-collapse furrows on the sloping surface. A gridded map of the soil runoff intensity compiled according to the developed equations shows that the soil loss intensity due to water erosion varies from 5 to 20 t/ha per year. Within 11 estimated zones, there is a difference in the areas of high-intensity soil runoff plots (20 t/ha per year and more). The regional methodology proposed in the article for soil losses assessment using caesium-137 radionuclide and morphometric topography indicators requires verification by an independent method.

KEYWORDS: Chernobyl origin caesium-137, satellite images, catchment area, profile curvature, soil runoff intensity, GIS

ВВЕДЕНИЕ

Цель настоящего исследования — изучить возможности разработки расчетных зависимостей для расчета потерь почвы вследствие водной эрозии за период с 1986 г. по настоящее время с использованием параметров, полученных в результате использования комплекса методов. Среди них — радиоцезиевый метод [Маркелов, 2004; Голосов и др., 2022; Трофимец и др., 2023; Lobb et al., 1995; Walling, He, 1999; Mabit et al., 2008; Olson et al., 2013; Porto et al., 2016; Quijano et al., 2016] (позволивший диагностировать смыв почвы за период после чернобыльской аварии), дистанционные методы (позволившие вычленивать на изучаемой поверхности элементы ложбинного комплекса), морфометрические показатели рельефа (выступавшие предикторами в регрессионных зависимостях).

¹ Orel State University, Institute of Natural Sciences and Biotechnology, 95, Komsomolskaya str., Orel, 302026, Russia, *e-mail*: trofimetc_1_n@mail.ru

² Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Department of Cartography and Geoinformatics, 33, 10th line of Vasil'evsky island, St. Petersburg, 199178, Russia, *e-mail*: panidi@ya.ru, e.panidi@spbu.ru

³ Orel State University, Medical Institute, Department of Internal Medicine, 95, Komsomolskaya str., Orel, 302026, Russia, *e-mail*: arcotel@yandex.ru

⁴ Orel State University, Institute of Natural Sciences and Biotechnology, 95, Komsomolskaya str., Orel, 302026, Russia, *e-mail*: 7oup@mail.ru

В ходе исследования решались следующие задачи:

- 1) обосновать выделение расчетных участков, отличающихся по условиям протекания водной эрозии на сельскохозяйственном поле в пределах экспериментального участка (рис. 1);
- 2) разработать расчетные зависимости активности цезия-137 от морфометрических показателей рельефа для выделенных расчетных участков;
- 3) рассчитать интенсивность потерь почвы вследствие водной эрозии для выделенных участков;
- 4) используя в качестве основы разработанные математические зависимости, построить сеточную карту смыва почвы для изучаемого экспериментального участка.



Рис. 1. Спутниковый снимок экспериментального участка сельскохозяйственного поля. Quickbird, дата съемки 16.05.2003, доступен для просмотра в Google Earth™
Fig. 1. Satellite image of an experimental area in an agricultural field. Quickbird, collection date 16.05.2003, available for visual study Google Earth™

Карпачевский [1983] писал: «Подсчитано, что ежегодно в реки, озера и моря сносится из почвы столько питательных веществ, сколько вырабатывают все заводы мира, производящие минеральные удобрения, за десять лет. Правильная организация территории, разумная система земледелия — вот лучшие лекарства от эрозии». «Перераспределение материала в ландшафте приводит к тому, что в пределах этой природной системы

образуется цепь — ряд почв, названных английским ученым А. Милном катеной (от английского catena — цепь, ряд)». Проявление водной эрозии будет зависеть от «перераспределения почвенного материала в ландшафте». Отсюда исходит актуальность исследований, реализующих принцип дифференцированного подхода к изучению воздействия водной эрозии на почвы сельскохозяйственных полей. В настоящей статье делается попытка использовать цезий-137 в качестве маркера потерь почвы вследствие эрозии [Маркелов, 2004; Голосов и др., 2022; Lobb et al., 1995; Walling, He, 1999; Mabit et al., 2008; Olson et al., 2013; Porto et al., 2016; Quijano et al., 2016] и полученные в полевых условиях результаты измерения активности радионуклида вдоль катен использовать для построения расчетных зависимостей интенсивности потерь почвы вследствие водной эрозии в зависимости от положения анализируемой точки в рельефе в пределах отдельных ландшафтов. По этой причине делается акцент на выделение ландшафтов, описывается принцип их вычленения на склоновой поверхности, приводятся расчетные зависимости, построенные для каждого из выделенных ландшафтов (названных авторами расчетными участками). Эти зависимости позволили провести расчет интенсивности потерь почвы в пределах каждого из выделенных участков и построить карту интенсивности потерь почвы для каждой точки склоновой поверхности. Авторы надеются, что результаты исследования внесут свой вклад в формирование разумной системы земледелия.

Анализ спутникового снимка сверхвысокого (~0,5 м/пикс)¹ пространственного разрешения (рис. 1) показал, что поверхность изучаемого участка поля осложнена комплексом ложбин разного размера и разной глубины вреза. Уклоны поверхности поля имеют диапазон от 1° до 10° и более (рис. 2). Это свидетельствует о необходимости дифференцированного подхода к анализу условий формирования потерь почвы вследствие водной эрозии. В настоящей работе обосновывается необходимость выделения в пределах склоновой поверхности 11 расчетных районов (участков, рис. 2).

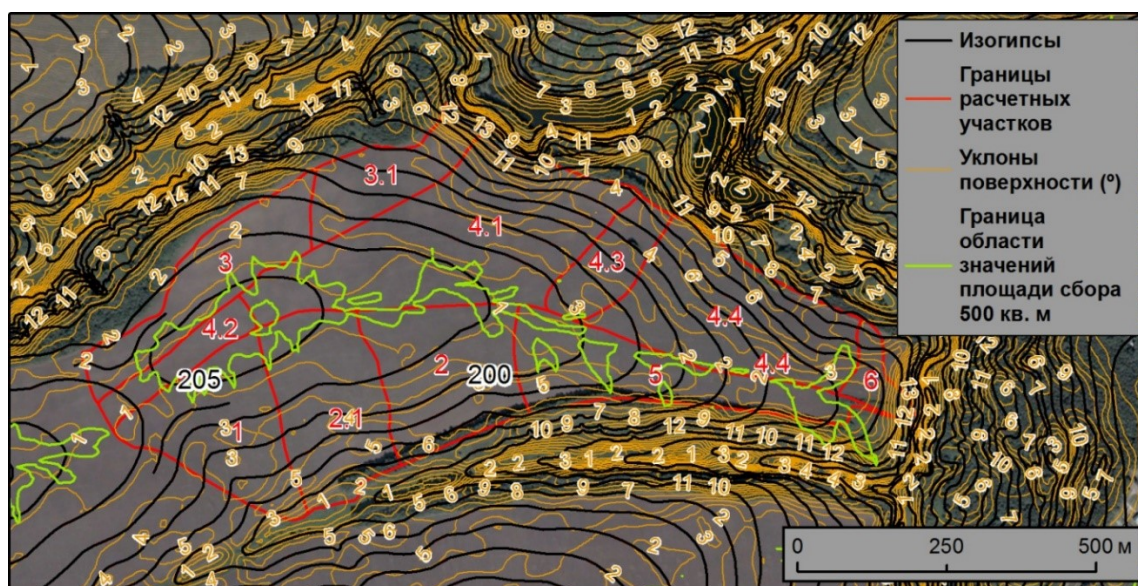


Рис. 2. Расчетные участки на карте уклонов поверхности
Fig. 2. Estimated zones on the surface slope map

¹ Геопространственное агентство «Иннотер». Космические снимки сверхвысокого разрешения. Электронный ресурс: <https://innoter.com/articles/kosmicheskie-snimki-sverkhvysokogo-razresheniya/> (дата обращения 04.04.2024)

Для каждого участка предлагается своя система расчетных зависимостей, позволяющих рассчитывать активность цезия-137 в каждой точке в пределах конкретного участка. По активности цезия-137 (он выступает маркером степени потерь почвы вследствие водной эрозии) рассчитывается интенсивность потерь почвы. Построенная на основе полученных зависимостей сеточная карта интенсивности потерь почвы (в т/га/год) показала, что потери почвы на изучаемом участке сельскохозяйственного поля изменяются от 5 до более чем 20 т/га/год.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальный участок, в пределах которого осуществлялась дифференциация склоновой поверхности на расчетные участки, изучается авторами с 2010 г. Авторы проанализировали более 500 точек. В этих точках интегрально (из слоя 0–25 см) были отобраны пробы почвы (в период с 2016 по 2023 гг.) и проведен их гамма-спектрометрический анализ¹ на активность цезия-137. Точки пробоотбора вдоль катен показаны на рис. 3. Ошибка измерений активности цезия-137 авторами была принята равной 20–30 % (согласно ГОСТ Р 54038-2010. Почвы²). Для обоснования выделения расчетных участков на анализируемом склоне был проведен анализ спутникового снимка сверхвысокого разрешения (рис. 1), топографической карты м-ба 1: 10 000 и карт, построенных в ГИС (уклонов поверхности (рис. 2), площади сбора и профильной кривизны (рис. 4)). Цифровая модель рельефа (ЦМР) была создана по данным топографической основы м-ба 1: 10 000. По ЦМР рассчитаны морфометрические показатели рельефа (площадь сбора и профильная кривизна) с использованием инструментов программного обеспечения SAGA GIS. Площадь сбора [Шарый, 2005] рассчитывалась с использованием алгоритма DEMON (Digital Elevation Model Networks) [Costa-Cabral, Burges, 1994].

Алгоритм DEMON предполагает расчет направления тока в каждой ячейке ЦМР на основе локальной экспозиции склона, вычисляемой с шагом в 1°. Поток через каждую клетку — это поток, пришедший к этой клетке, плюс поток, порожденный самой клеткой. Когда поток достигает края ячейки ЦМР под прямым углом, весь поток передается к одному соседу. В других случаях поток разделяется между соседями. Площадь сбора для каждой ячейки вычисляется путем последовательного суммирования площадей ячеек, составляющих все потоки через данный пиксель, и деления на коэффициент, задающий ширину потока. Крутизна рассчитана в ArcGIS: с помощью модуля 3D Analyst на основе ЦМР рассчитаны значения максимальной крутизны в градусах для каждой ячейки ЦМР. Затем построен растр, аналогичный ЦМР, но со значениями крутизны в ячейках. Профильная (вертикальная) кривизна рассчитана в ArcGIS. Вычисления произведены по формулам, приведенным в работе [Evans, 1972], с помощью приложения к ArcGIS — DEM Surface Tools³.

Каждому значению активности цезия-137 в точке интегрального пробоотбора почвы в соответствие ставились значения площади сбора и профильной кривизны. В результате корреляционного и регрессионного анализа были получены расчетные уравнения для каждого из выделенных участков.

¹ Методика измерения активности радионуклидов в счетных образцах на сцинтилляционном гамма-спектрометре с использованием программного обеспечения «Прогресс». ГП «ВНИИФТРИ», 1996. 41 с.

² ГОСТ Р 54038-2010. Почвы. Методика определения ¹³⁷Cs в почвах сельхозугодий. Применяется с 01.01.2012

³ Jenness Enterprises. Электронный ресурс: http://www.jennessent.com/arcgis/surface_area.htm (дата обращения 04.04.2024)



Рис. 3. Точки интегрального пробоотбора в слое 0–25 см на спутниковом снимке. 2.1 — номер участка; 11 — намыто (в случае «-» — смыто) см
 Fig. 3. Locations of integral (in the 0–25 cm layer) soil sampling in the satellite image. 2.1 — zone number; 11 — inwashed (in the case of “-” — outwashed) cm

Разделение поля на участки осуществлялось после анализа спутникового снимка сверхвысокого разрешения, топографической карты, карт уклонов, площади сбора и профильной кривизны. Анализ спутникового снимка сверхвысокого разрешения (рис. 1) показал, что поверхность поля испещрена ложбинами разной длины и площади. На первом этапе анализа были выделены участки с разной степенью расчлененности поверхности ложбинным комплексом. На втором этапе был проведен анализ уклонов поверхности (рис. 2) и выделены участки, отличающиеся по величине крутизны поверхности, подвергающейся водной эрозии. На третьем этапе по картам площади сбора (рис. 4) проводили уточнение границ расчетных участков. На этом этапе был проведен анализ вариабельности активности цезия-137 в области водораздельной поверхности на протяжении всей склоновой поверхности. Было сделано заключение, что на рассматриваемом склоне вдоль водораздельной поверхности точки, по величине активности цезия-137 в пахотном слое соответствующие величине, которая может быть принята в качестве опорной, практически все приурочены к площади сбора 500 м² (рис. 5).

Этот участок был выделен в качестве области, в пределах которой следует назначать опорные площадки. Однако анализ показал, что в пределах этой области должны быть выделены по меньшей мере два участка. Один — это участок водораздельной поверхности, приуроченный к блочным повышениям [Овчинников, 2009; Алифанов и др., 2010] (авторы назвали его участок опорных площадок), второй — участок, включающий в себя всю остальную площадь, вне опорных площадок. Вычленение участка вне опорных площадок продиктовано необходимостью учета в расчетной схеме тех участков водораздельной поверхности, которые пересечены свально-развальными бороздами и прочими понижениями. Для обоснования выделения в пределах площади сбора 500 м² участка, приуроченного с межблочным понижениям и свально-развальным бороздам, был проведен анализ в более крупном м-бе (1: 500).

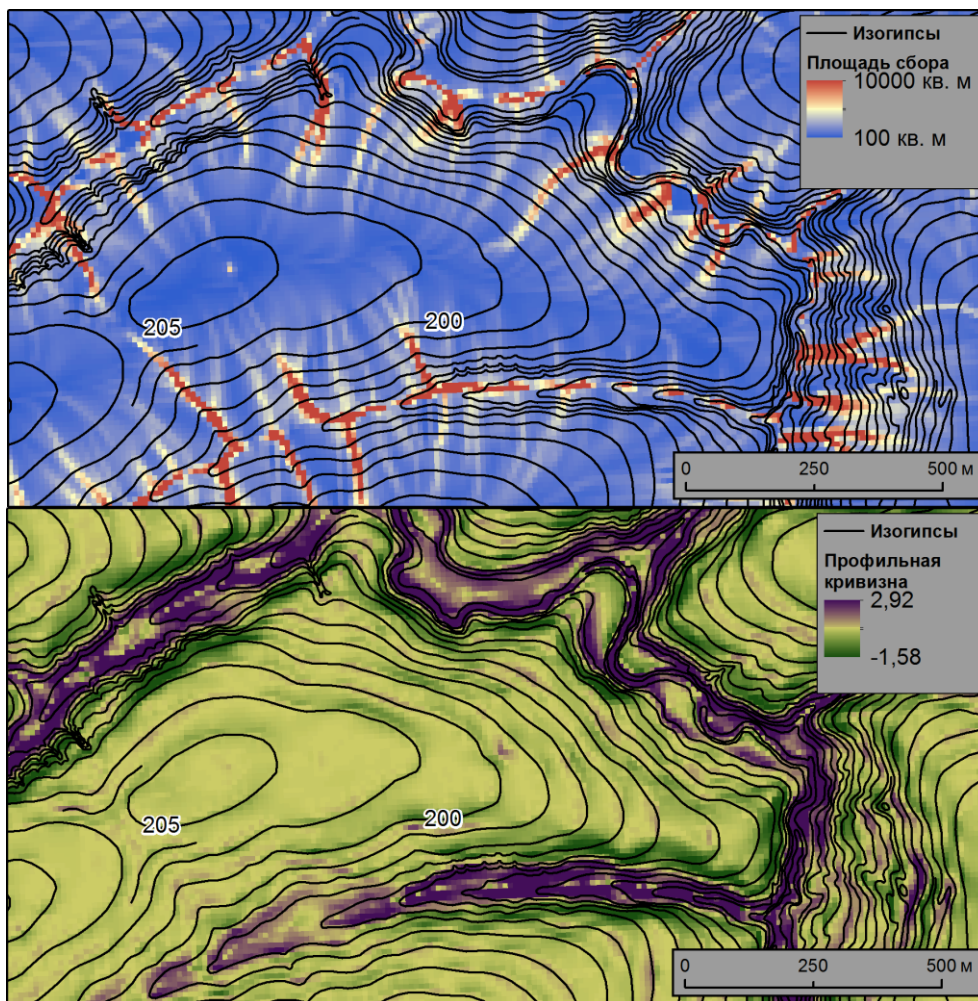


Рис. 4. Карты площади сбора (сверху) и профильной кривизны (снизу)
 Fig. 4. Maps of the catchment area (top image) and profile curvature (bottom image)

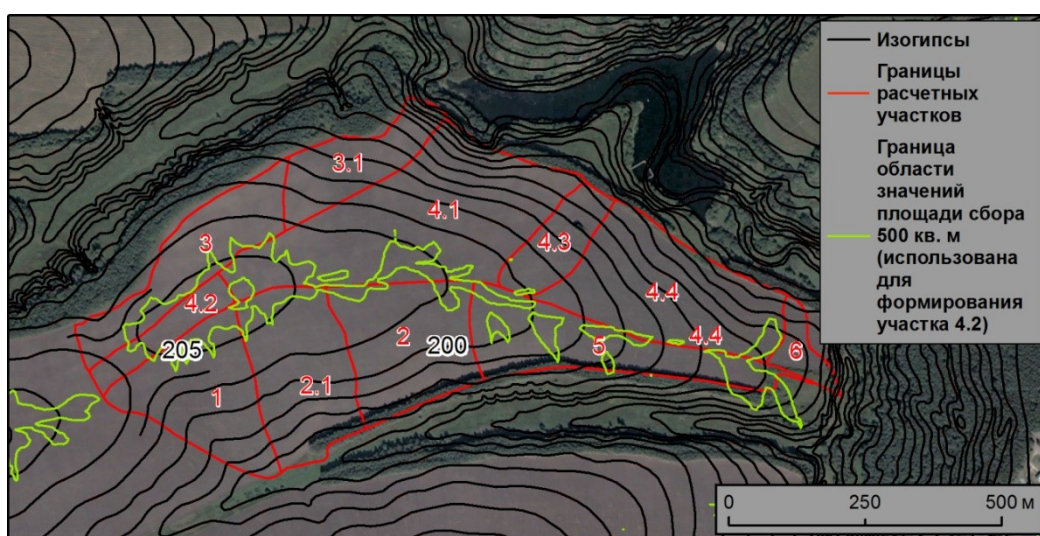


Рис. 5. Расположение расчетных участков
 Fig. 5. Location of the estimated zones

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Авторы использовали результаты тахеометрической съемки, которая позволила построить карту площади сбора и профильной кривизны в м-бе 1: 500. Анализ этой карты подтвердил, что в пределах водораздельной площади имеются локальные понижения. Это свидетельствует о том, что есть все основания для вариабельности активности цезия-137 (точки пробоотбора попадают то в локальные понижения, то на блочные повышения и на микроводоразделы ложбин). Дело в том, что распашка склона на изучаемом поле долгие годы велась вдоль его падения. На поверхности образовались продольные понижения, приуроченные к свально-развальным бороздам, год от года «накладывавшимся» друг на друга. Эти понижения, по которым, видимо, формировались временные ручьи в период высокого стока, обусловили вариабельность активности цезия-137. В местах смыва почвы активность цезия-137 регистрируется пониженной вследствие припахивания глубокого, незагрязненного радиоцезием почвенного горизонта. В местах, не затронутых свально-развальными бороздами, активность цезия-137 отмечается повышенной. Эти выводы привели авторов к заключению, что для водораздельной поверхности в пределах площади сбора 500 м² (вне опорных площадок) следует также разработать зависимость активности цезия-137 от площади сбора и профильной кривизны. Такая зависимость была разработана (уравнение для участка № 4.2 (вне опорных площадок) на рис. 6).

В связи с тем, что вариабельность активности цезия-137 была обнаружена и в пределах участка опорных площадок, то для него (этого участка) было также предложено расчетное уравнение зависимости активности цезия-137 от площади сбора (уравнение 4.2 (опорные площадки) на рис. 6). В ходе анализа сравнивались измеренные в пахотном горизонте значения активности цезия-137 на водораздельной поверхности со значениями цезия-137, принятыми ранее в качестве опорных точек [Трофимец и др., 2022]. Значение активности цезия-137, принятое в качестве опорного (174,7 Бк/кг), полученное по выбранным на блочных повышениях точкам (измерения проводились в 2018 г.), для последующих лет может корректироваться по формуле распада радионуклида [Имшенник, 2011]. Тем не менее, с 2018 г. прошло пять лет. Уменьшение активности цезия-137 за этот период оказалось таким, которое по величине находится в пределах ошибки измерения активности цезия-137 на гамма-спектрометре (не менее 20 %). Это позволило «работать» с активностью цезия-137, принятой ранее в качестве опорного значения и равной 174,7 Бк/кг.

Дополнительно вдоль периметра поля в 10 точках в 2023 г. были отобраны послойно через 2 см по глубине пробы почвы и проведен их гамма-спектрометрический и агрохимический анализ. Авторы предполагали, что эти точки позволят оценить величину доставки смытой почвы с территорий участков к окраинам участков. В табл. 1 приведены результаты анализа, согласно которым стало возможным сделать заключение о преобладающем процессе на анализируемом участке поля, «закрываемым» точкой послойного пробоотбора. Диаграммы, построенные для точек пробоотбора (рис. 7–9), позволили дать дополнительную характеристику выделенным расчетным участкам. В частности, диаграмма распределения цезия-137 по глубине в точке 214231 свидетельствует о том, что точка зафиксировала смыто-намытые почвы. При глубине вспашки в 1986 г. в 25 см мощность слоя почвы в точке не превышает 22 см. В точке 214231 практически зафиксирован весь пахотный горизонт до глубины 25 см. Недостающие 2 см можно отнести к погрешности измерений. Однако в этой точке почвы смыто-намытые (об этом свидетельствует невысокая активность цезия-137 в пахотном слое).

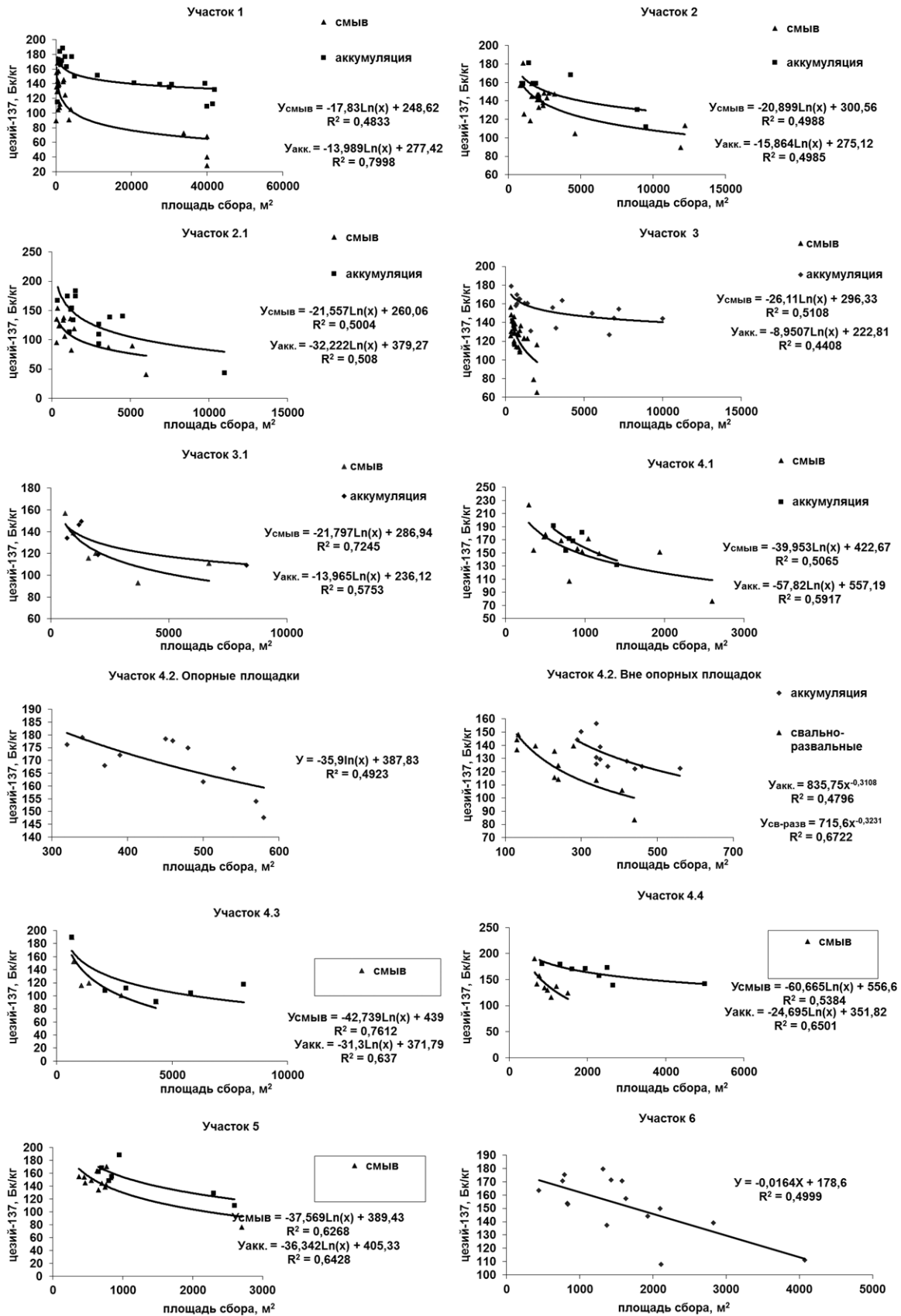


Рис. 6. Зависимости, разработанные для расчетных участков
Fig. 6. Computational dependencies developed for the estimated zones

Табл. 1. Результаты диагностики почв разной степени смывости в точках послойного пробоотбора почвы по глубине
 Table 1. The results of varying washout degree soils' diagnostics at the plots of layered soil sampling in depth

№ точки послойного по глубине отбора почвы	Номер точки на карте (рис. 7)	Цезий-137 (толщина слоя, см)	Содержание гумуса, % (толщина слоя, см)	Степень смывости почв в точке
214231	1	89,0 (0–16 см)	3,3 (0–16 см)	СМЫТЫЕ
214232	2	120,9 (0–32 см)	3,2 (0–32 см)	СМЫТО-НАМЫТЫЕ
214233	3	96,8 (0–18 см)	2,3 (0–18 см)	СМЫТЫЕ
214234	4	111,5 (0–18 см)	2,2 (0–18 см)	СМЫТЫЕ
214235	5	106,3 (0–36 см)	3,3 (0–36 см)	СМЫТО-НАМЫТЫЕ
269231	6	152 (0–26 см)	4,0 (0–26 см)	НЕСМЫТЫЕ/СЛАБОСМЫТЫЕ
269232	7	119,0 (0–34 см)	3,0 (0–34 см)	СМЫТО-НАМЫТЫЕ
269233	8	125,7 (0–36 см)	3,6 (0–36 см)	СМЫТО-НАМЫТЫЕ
269234	9	100,8 (0–20 см)	3,5 (0–20 см)	СМЫТЫЕ
269235	10	90,2 (0–26 см)	3,7 (0–26 см)	СМЫТО-НАМЫТЫЕ

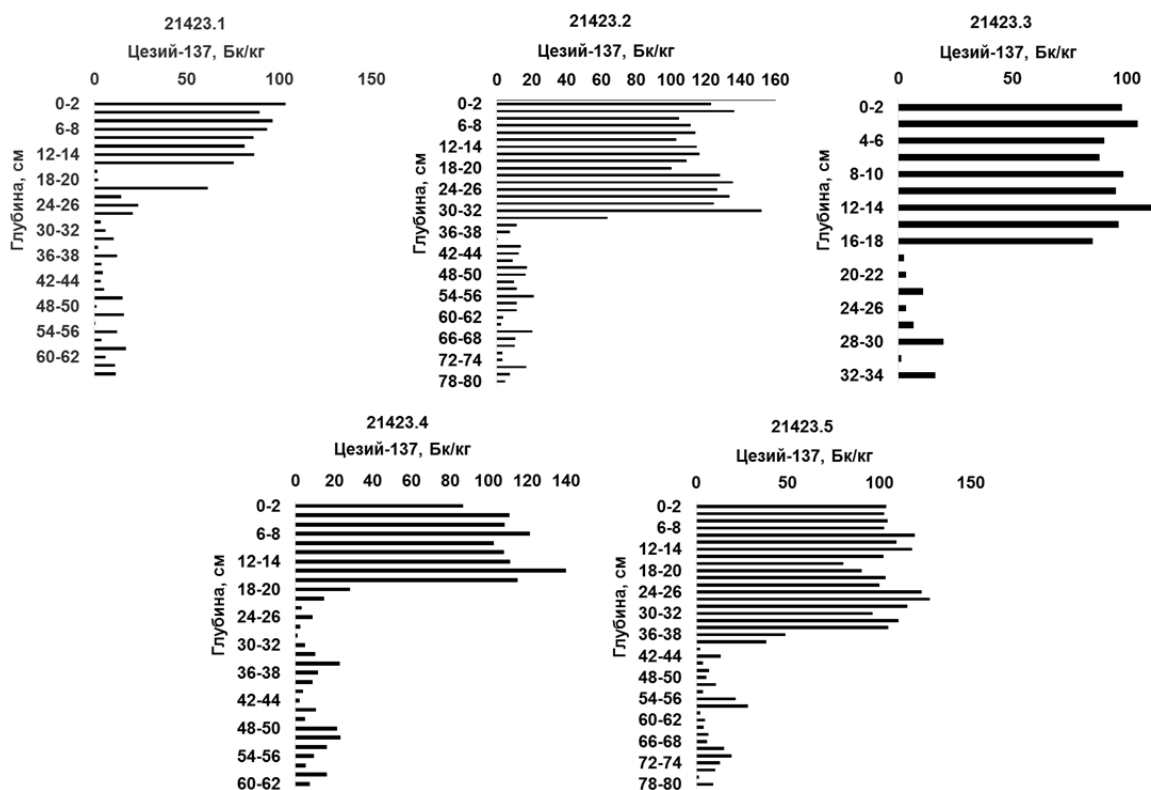


Рис. 7. Диаграммы распределения цезия-137 в точках пробоотбора на южной оконечности поля вдоль его периметра
 Fig. 7. Diagrams of the caesium-137 distribution at sampling plots at the southern tip of the field along its perimeter

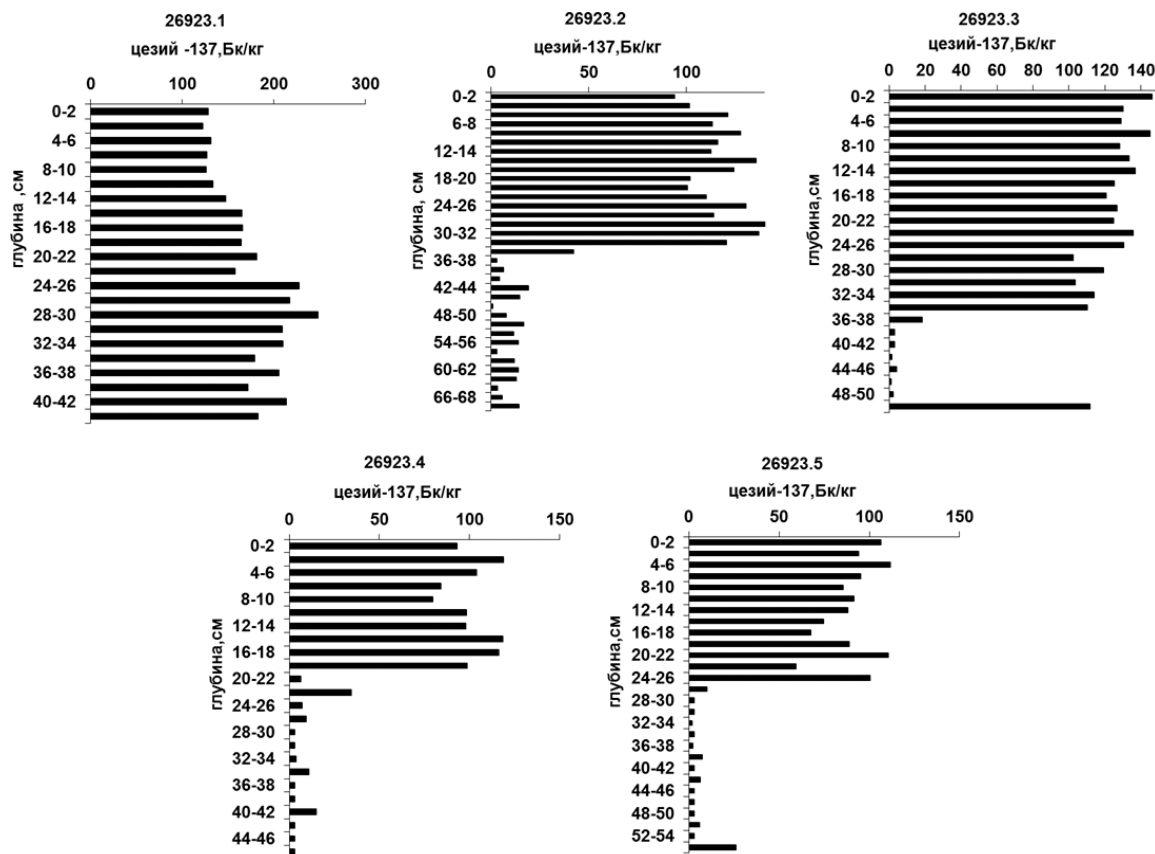


Рис. 8. Диаграммы распределения цезия-137 в точках послойного пробоотбора вдоль северной части периметра поля
 Fig. 8. Diagrams of the caesium-137 distribution at the plots of layered sampling along the northern part of the field perimeter

В результате было сделано заключение, что в точках 214231, 214232, 214235 находятся смыто-намытые почвы; а в точках 214233 и 214234 — смытые почвы. Как видно из рис. 7 и 8, распределение цезия-137 четко показывает, какая степень смытости почв имеет место в каждой точке. Дополнительный анализ распределения по глубине гумуса (рис. 9) не позволил уточнить степень смытости почв. Авторы сделали вывод, что диагностировать степень смытости почв по эюре распределения гумуса практически невозможно, т. к. на участке мы имеем дело со старопахотными почвами [Чендев, 1977; Ковда, 1981; Кухарук и др., 2011].

Особое внимание авторов привлек участок № 4.3. Анализ диаграммы послойного пробоотбора в точке 10 (рис. 2) показал, что в устье водосбора ложбины в 1986 г., видимо, выпадали осадки, загрязненные радиоцезием, которые аккумулировались в локальном понижении. Сформировался мощный слой (более 40 см) загрязненной радиоцезием почвы. Причем пробоотбор показал, что измерениями не затронут слой дочернобыльской почвы. На рис. 8 (точка 26923.1) видно, что слой чернобыльской почвы, не затронутый пахотой, начинается на глубине, где активность цезия-137 достигает значения не менее 200 Бк/кг. Выше находится слой почвы, намытой после 1986 г. Этот слой фиксирует почву, смытую с водосбора ложбины, подвергнутого перепашке. Очевидно, что почвы, в разной степени смытые, доставлялись к устью ложбины (вместе с перемещаемыми пахотными орудиями слоями смытой в разной степени почвы). Все это обусловило выделение на эюре двух слоев — почвы «чернобыльской», т. е. сохранившейся с 1986 г. (глубже 30 см) и слоя

смыто-намытой почвы (выше 30 см). Водосбор этой ложбины был выделен в отдельный расчетный участок № 4.3 (рис. 2, б). Водосбор самой крупной ложбины был выделен в отдельный расчетный район № 1. Следует заметить, что в настоящей статье авторы сделали уточнение ранее предложенного уравнения для этой ложбины [Трофимец и др., 2022]. Уточнение стало возможным при добавлении новых точек измерений.

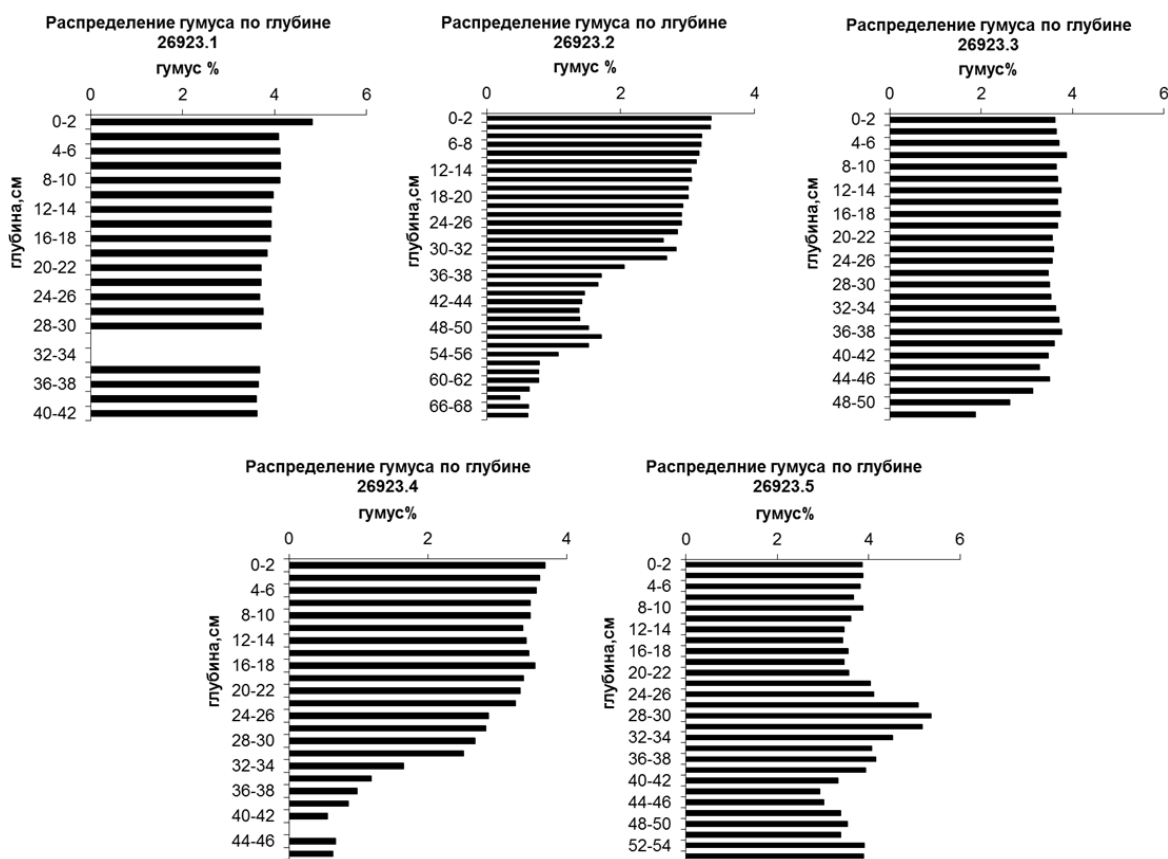


Рис. 9. Диаграммы распределения гумуса в точках послойного пробоотбора вдоль северной части периметра поля
 Fig. 9. Diagrams of humus distribution at the plots of layered sampling along the northern part of the field perimeter

Отдельно авторами рассматривался участок поля с сильновыпаханными почвами [Таразанова, 2002; Борисов, 2008]. В его пределах выделены два расчетных участка, № 3 и 3.1. Они были выделены ввиду того, что отличаются по степени расчлененности поверхности. Анализ карты уклонов показал целесообразность выделения участка № 3.1 со значениями уклонов, превышающими 6° (на его восточной окраине, табл. 2). В пределах этого участка смыв почвы, очевидно, должен проходить с повышенной интенсивностью. Уклоны поверхности в пределах участка № 3 не превышают 2°. Пробы почв в пределах участка с сильновыпаханными почвами были подвергнуты гамма-спектрометрическому анализу, агрохимическому анализу, анализу на содержание легкоразлагаемого органического вещества (ЛОВ) [Таразанова, 2002; Борисов, 2008]. Участки с почвами, в различной степени выпаханности, сегодня должны находиться в зоне пристального внимания, т. к. с 1991 г. сократилось внесение удобрений на поля России в целом и Орловской области в частности. Можно утверждать, что агрогенная трансформация почв в зоне

сельскохозяйственного освоения [Ахтырцев, Щетинина, 1969; Кирюшин, 2000] активизировалась. Участок № 2.1 был выделен в отдельный расчетный участок ввиду того, что он практически занимает водосборы нескольких ложбин с площадями водосборов в пределах до 15 000 м².

Табл. 2. Основные морфометрические характеристики 11 расчетных участков
Table 2. The main morphometric characteristics of the 11 estimated zones

№ участка	Доля (%) площади сбора 500 м ²	Максимальная площадь сбора, м ²	Диапазон уклонов, °	Длина склона, м	Наименьшая измеренная активность цезия-137, Бк/кг	Площадь сбора, соответствующая наименьшей измеренной активности цезия-137
1	20	50000	2–7	320	105	45000
2	10	14000	2–5	210	105	13000
2.1	15	15000	2–6	300	70	6000
3	5	7000	1–2	100	95	3000
3.1	0	6500	3–12	140	92	6500
4.1	10	9200	1–12	290	100	2500
4.2*	100	500	1–2	100	95	490
4.3	0	9000	1–6	250	80	4800
4.4	3	9000	1–6	230	105	1700
5	50	3000	2–5	150	90	3000
6	5	9000	1–14	120	110	4200

*вне опорных площадок

Установить величину площадей водосбора ложбин («сбора» по терминологии Шарого [Шарый, 2005] оказалось наиболее удобно по карте площади сбора (рис. 4). Выделение в пределах расчетных участков зон аккумуляции осуществляли по карте профильной кривизны (рис. 4). Отрицательные значения профильной кривизны соответствовали зонам аккумуляции (пониженным участкам). Положительные значения соответствовали зонам смыва.

Проведение корреляционного и регрессионного анализов, с помощью которых были получены расчетные зависимости, позволило перейти к этапу расчета интенсивности смыва почвы и построению сеточной карты. Пересчет активности цезия-137 в интенсивность смыва почвы осуществляли по зависимости (1). Опорное значение активности цезия-137 было принято равным 174,7 Бк/кг. Авторы придерживаются точки зрения, что погрешность гамма-спектрометрического анализа 20–30 % позволяет считать, что снижение опорного значения (с 2017 по 2022 г.) находится в пределах ошибки измерения и не требует пересчета активности опорного значения цезия-137. Плотность серой лесной почвы — 1 110 кг/м³.

$$R = 10 \times \frac{BZ_p}{t - t_0} \times (A - 1) \quad (1),$$

где R — смыв почвы, т/га/год;
 B — плотность серой лесной почвы, 1 110 кг/м³;
 Z_p — мощность пахотного горизонта (0,25 м);
 $(t - t_0)$ — период (36 лет), прошедший с даты аварии на ЧАЭС (1986 г.) до даты отбора проб почвы (2022 г.);
 A — отношение активности цезия-137 в интегральном образце почвы (в точке отбора пробы почвы) к удельной активности цезия-137 на опорном участке [Маркелов, 2004; Голосов и др., 2022].

За опорное значение была принята радиоактивность почвы на блочных повышениях водораздела, измеренная в 2017 г. 10 — коэффициент перехода к т/га.

Все вышеизложенное свидетельствует о том, что поле — это мозаика почв с разной степенью смывости. В первом приближении можно учесть особенность строения поверхности поля, определяющую подверженность ее водной эрозии, дифференцировав ее на несколько расчетных участков. В статье предлагается вычленить на изучаемой территории 11 характерных участков. Для них разработаны уравнения, позволяющие рассчитывать активность цезия-137 в точке в зависимости от величины площади сбора и знака профилльной кривизны в этой точке.

В результате проведенного исследования был сделан вывод, что изучать (и рассчитывать) потери почвы вследствие водной эрозии надо по характерным ландшафтными участкам [Карпачевский, 2005; Кирюшин, 2020]. Какие показатели положить в основу выделения ландшафтных участков, авторы решали в ходе исследования. Основу исследований составила обширная база данных (более 500 проб почвы, отобранных как интегрально из слоя 0–25 см, так и послойно). Интегральные пробы отбирались вдоль катен (рис. 3).

Анализ морфометрических характеристик расчетных районов (табл. 2) показал следующее. Наибольший смыв почвы, маркируемый значением активности цезия-137, равном 65 Бк/кг (при площади сбора 45 000 м²), на участке № 1 сравним с таковым на участке № 2.1 при площади сбора, равной 6 000 м² (при равных длинах склонов, соответственно 320 м (участок № 1) и 300 м (участок № 2.1)). Вероятно, на участке № 2.1 произошло «наложение» тальвегов свально-развальных борозд на тальвеги ложбин. Аналогичная ситуация, видимо, возникла на участке № 2, на котором смыв почвы с площади водосбора 13 000 м² и с более короткого склона (220 м) такой же по величине (маркируется активностью цезия-137, равной 105 Бк/кг), как на участке № 1, где площадь водосбора ложбины больше в 3 раза (45 000 м²).

На участке № 3 при площади сбора 3 000 м², меньшей, чем площадь сбора на участке № 3.1 (6 500 м²), отмечаются практически равные значения минимальной активности цезия-137 (95 и 92 Бк/кг соответственно). Это свидетельствует о большей эрозионной активности ложбин стока на участке № 3. На участках № 4.1 и № 4.2 (вне опорных площадок) активность цезия-137 одинаковая (100 и 95 Бк/кг соответственно) при площадях сбора, различающихся в 5 р. (2 500 на участке № 4.1 и 490 м² на участке № 4.2). Это говорит о том, что на участке № 4.2, расположенном в пределах водораздельной поверхности, эрозионные потери почвы происходят в тальвегах свально-развальных борозд. Пятый участок сравним по эрозионной активности с участком № 4.2 (вне опорных площадок). Минимальная активность цезия-137, соответственно, равна 90 (на участке № 5) и 95 (на участке № 4.2). Однако площадь, «работающая» на смыв, на участке 5 в 6 раз больше, чем на участке № 4.2, что еще раз подтверждает роль борозд в эрозионном преобразовании

поверхности на участке № 4.2. Наконец, сравнение участков №№ 4.4 и 6 показало большую эрозионную работу ложбин на участке № 4.4. Несмотря на большую длину склона в пределах участка № 4.4 (230 м против 120 м на участке № 6), на участке № 4.4 действует такой же интенсивности смыв (маркируемый активностью цезия-137, равной 105 Бк/кг) при действующей площади сбора 1 700 м², как и на участке № 6 (110 Бк/кг) при действующей площади в 2,5 раза большей (4 200 м²).

По результатам выполненного анализа видно, что формирование эрозионных процессов на экспериментальном участке характеризуется разнообразием, пока не поддающимся в полной мере объяснению [Шарый, 2005; Тишкина, Иванова, 2010]. Тем не менее, авторы, разработавшие 11 расчетных уравнений (рис. 5), положили их в основу построения сеточной карты интенсивности потерь почвы вследствие водной эрозии (рис. 10). Анализ этой карты показал, что интенсивность смыва почвы за изучаемый период (с 1986 по 2022 гг.) изменяется от 5 до более чем 20 т/га/год.

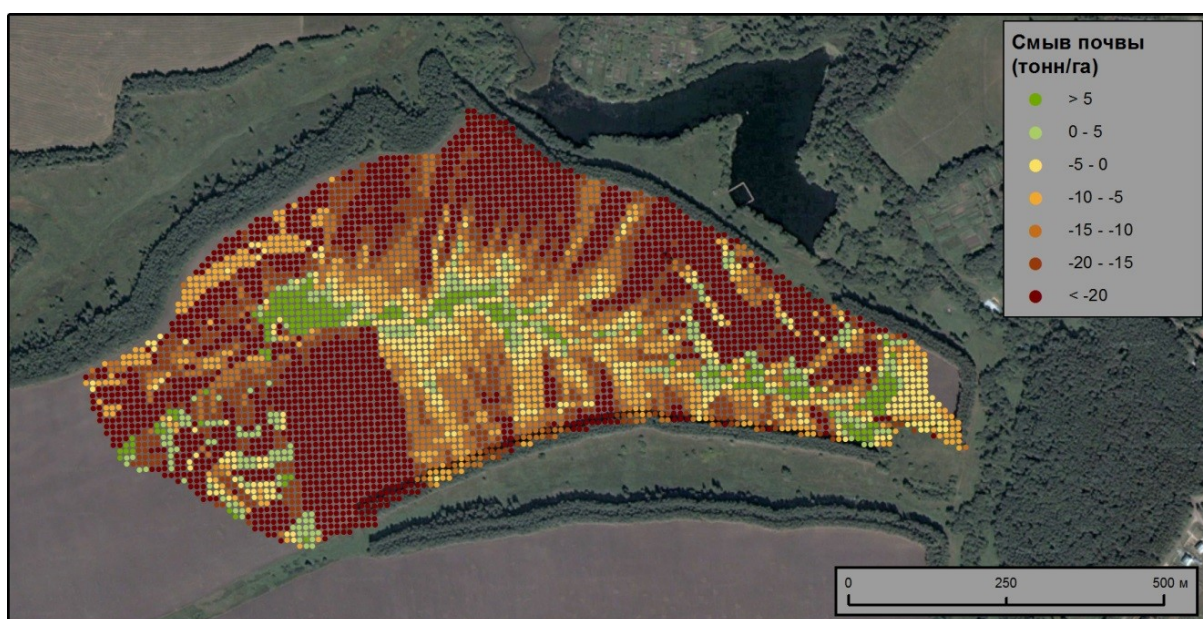


Рис. 10. Сеточная карта интенсивности смыва почвы, построенная на основе уравнений (рис. 6)
 Fig. 10. A gridded map of the soil runoff intensity, based on the Fig. 6 equations

ВЫВОДЫ

В статье предлагается полуэмпирический метод расчета эрозионных потерь серой лесной почвы на участках сельскохозяйственных полей с использованием цезия-137 в качестве маркера почв, в разной степени смытых. На рассматриваемом поле выделено 11 расчетных участков, для которых разработаны расчетные уравнения зависимости активности цезия-137 от площади сбора и профильной кривизны. Построена сеточная карта интенсивности смыва почвы за период с 1986 по 2022 г. Интенсивность смыва почвы велика — до более 20 т/га/год.

Не дана оценка той части почвы, которая выносится с поля за его пределы. Сложность заключается в том, что поле по периметру окружено дорогами и овражно-балочными лесополосами. Для разработки этого раздела методики требуется проведение дополнительных измерений и наблюдений в полевых условиях.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке РФФ, грант № 23-27-00298¹. Спутниковые снимки предоставлены DigitalGlobe Foundation.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was carried out with the support of the RSF, grant No. 23-27-00298². Satellite image courtesy of DigitalGlobe Foundation.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алифанов В. М., Гугалинская Л. А., Овчинников А. Ю. Палеокриогенез и разнообразие почв центра Восточно-Европейской равнины. М.: ГЕОС, 2010. 160 с.

Ахтырцев Б. П., Щетинина А. С. Изменение серых лесных почв Среднерусской лесостепи в процессе сельскохозяйственного освоения. Саранск, 1969. 164 с.

Бобровицкая Н. Н. Водная эрозия на склонах и сток речных наносов. Диссертация в виде научного доклада доктора географических наук. СПб.: Издательство ГГИ, 1995. 58 с.

Борисов Б. А. Легкоразлагаемое органическое вещество целинных и пахотных почв зонального ряда европейской части России. Автореферат диссертации доктора биологических наук. М.: Издательство МСХА, 2008. 43 с.

Голосов В. Н., Жидкин А. П., Петелько А. И., Осипова М. С., Иванова Н. Н., Иванов М. М. Полевая верификация эрозионных моделей на основе исследований малого водосбора в бассейне р. Воробжи (Курская область). Почвоведение, 2022. № 10. С. 1321–1338. DOI: 10.31857/S0032180X22100045.

Имшенник Е. В. Картографическое прогнозирование загрязнения ¹³⁷Cs наиболее пострадавших в результате аварии на ЧАЭС регионов России. Автореферат диссертации кандидата географических наук. М.: Издательство ИГКиЭ РИРАН, 2011. 22 с.

Карпачевский Л. О. Зеркало ландшафа. М.: Мысль, 1983. 156 с.

Карпачевский Л. О. Экологическое почвоведение. М.: ГЕОС, 2005. 337 с.

Кирюшин В. И. Экологизация земледелия и технологическая политика. М.: Издательство МСХА, 2000. 473 с.

Ковда В. А. Почвенный покров, его улучшение, использование и охрана. М.: Наука, 1981. 182 с.

Кухарук Н. С., Чендев Ю. Г., Петин А. Н. Микроморфологические особенности органического вещества при агрогенной трансформации почв лесостепной зоны. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки, 2011. № 15(110). Вып. 16. С. 168–179.

Маркелов М. В. Современные эрозионно-аккумулятивные процессы в верхних звеньях гидрографической сети лесной и лесостепной зон. Автореферат диссертации кандидата географических наук. М.: Издательство Московского университета, 2004. 22 с.

Овчинников А. Ю. Палеокриогенез как фактор дифференциации современных почв и почвенного покрова центра Восточно-Европейской равнины. Автореферат диссертации кандидата биологических наук. М.: Издательство Московского университета, 2009. 24 с.

¹ Российский научный фонд. Электронный ресурс: <https://rscf.ru/project/23-27-00298/> (дата обращения 04.04.2024)

² Russian Science Foundation. Электронный ресурс: <https://rscf.ru/project/23-27-00298/> (дата обращения 04.04.2024)

Таразанова Т. В. Диагностика степени выпаханности почв зонального ряда Европейской части России. Диссертация кандидата биологических наук. М.: Издательство МСХА, 2002. 148 с.

Тишкина Э. В., Иванова Н. Н. Почвенный покров распаханых и целинных прибалочных склонов (Курская область). Вестник Московского университета. Серия 5. География, 2010. № 6. С. 72–79.

Трофимец Л. Н., Паниди Е. А., Кочуров Б. И., Чаадаева Н. Н., Тяпкина А. П., Сараева А. М., Тарасов А. В., Баркалов А. О., Петелько А. И. Количественная оценка эрозионных потерь почвы на различных участках распаханного склона (бассейн Верхней Оки). ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Международной конференции. М.: Географический факультет МГУ, 2023. Т. 29. Ч. 1. С. 361–377. DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-361-377.

Трофимец Л. Н., Паниди Е. А., Лаврусевич А. А. Некоторые особенности применения радиоцезиевого метода изучения потерь почвы вследствие эрозии в перигляциальной области бассейна верхней Оки. Геоморфология, 2022. Т. 53. № 5. С. 154–161. DOI: 10.31857/S0435428122050170.

Чендев Ю. Г. Агротехногенное изменение темно-серых лесных почв Центральной лесостепи за последние 200 лет. Почвоведение, 1977. № 1. С. 10–21.

Шарый П. А. Оценка взаимосвязей рельеф-почва-растения с использованием новых методов в геоморфометрии. Автореферат диссертации кандидата биологических наук. Тольятти: Издательство ИФХиБПП РАН, 2005. 23 с.

Costa-Cabral M. C., Burges S. J. Digital Elevation Model Networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. Water Resources Research, 1994. V. 30. Iss. 6. P. 1681–1692. DOI: 10.1029/93WR03512.

Evans L. S. General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. Spatial Analysis in Geomorphology. London, Methuen & Co. Ltd., 1972. P. 17–90.

Lobb D. A., Kachanoski R. G., Miller M. H. Tillage translocation and tillage erosion on shoulder slope landscape positions measured using ^{137}Cs as a tracer. Canadian Journal of Soil Science, 1995. V. 75. No. 2. P. 211–218. DOI: 10.4141/cjss95-029.

Mabit L., Benmansour M., Walling D. E. Comparative advantages and limitations of the fallout radionuclides ^{137}Cs , ^{210}Pb and ^7Be for assessing soil erosion and sedimentation. Journal of Environmental Radioactivity, 2008. V. 99. Iss. 12. P. 1799–1807. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2008.08.009.

Olson K. R., Gennadiyev A. N., Zhidkin A. P., Markelov M. V., Golosov V. N., Lang J. M. Use of magnetic tracer and radio-cesium methods to determine past cropland soil erosion amounts and rates. Catena, 2013. V. 104. P. 103–110. DOI: 10.1016/j.catena.2012.10.015.

Porto P., Walling D. E., La Spada C., Callegari G. Validating the use of ^{137}Cs measurements to derive the slope component of the sediment budget of a small rangeland catchment in southern Italy. Land Degradation & Development, 2016. V. 27. Iss. 3. P. 798–810. DOI: 10.1002/ldr.2388.

Quijano L., Beguería S., Gaspar L., Navas A. Estimating erosion rates using ^{137}Cs measurements and WATEM/SEDEM in a Mediterranean cultivated field. Catena, 2016. V. 138. P. 38–51. DOI: 10.1016/j.catena.2015.11.009.

Walling D. E., He Q. Improved models for estimating soil erosion rates from cesium-137 measurements. Journal of Environmental Quality, 1999. V. 28. No. 2. P. 611–622.

REFERENCES

- Akhtyrtsev B. P., Shchetinina A. S.* The change of gray forest soils of the Central Russian forest steppe in the process of agricultural development. Saransk, 1969. 164 p. (in Russian).
- Alifanov V. M., Gugalinskaya L. A., Ovchinnikov A. Yu.* Paleocryogenesis and soil diversity of the center of the East European Plain. Moscow: GEOS, 2010. 160 p. (in Russian).
- Bobrovitskaya N. N.* Water erosion on slopes and runoff of river sediments. Doctoral dissertation in geographic sciences. St. Petersburg: SHI Publishing, 1995. 58 p. (in Russian).
- Borisov B. A.* Easily decomposable organic matter of virgin and arable soils of zonal range of the European part of Russia. Author's abstract of doctoral dissertation, biological sciences. Moscow: MTA Publishing, 2008. 43 p. (in Russian).
- Chendev Yu. G.* Agrotechnogenic change of dark gray forest soils of the Central forest steppe over the past 200 years. *Eurasian Soil Science*, 1977. V. 1. P. 10–21 (in Russian).
- Costa-Cabral M. C., Burges S. J.* Digital Elevation Model Networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. *Water Resources Research*, 1994. V. 30. Iss. 6. P. 1681–1692. DOI: 10.1029/93WR03512.
- Evans L. S.* General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. *Spatial Analysis in Geomorphology*. London, Methuen & Co. Ltd., 1972. P. 17–90.
- Golosov V. N., Zhidkin A. P., Petelko A. I., Osipova M. S., Ivanova N. N., Ivanov M. M.* Field verification of erosion models based on studies of a small catchment area in the Vorobzhi River basin (Kursk Region). *Eurasian Soil Science*, 2022. No. 10. P. 1321–1338 (in Russian). DOI: 10.31857/S0032180X22100045.
- Imshennik E. V.* Cartographic forecasting of ¹³⁷Cs pollution in the regions of Russia most affected by the Chernobyl accident. Author's abstract of PhD dissertation in geographic sciences. Moscow: Publishing of IGCE RRAS, 2011. 22 p. (in Russian).
- Karpachevsky L. O.* The mirror of the landscape. Moscow: Mysl', 1983. 156 p. (in Russian).
- Karpachevsky L. O.* Ecological soil science. Moscow: GEOS, 2005. 337 p. (in Russian).
- Kiryushin V. I.* Ecologization of agriculture and technological policy. Moscow: Publishing House of the Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 2000. 473 p. (in Russian).
- Kovda V. A.* Soil cover, its improvement, use and protection. Moscow: Nauka, 1981. 182 p. (in Russian).
- Kukharuk N. S., Chendev Yu. G., Petin A. N.* Features micromorphological organic matter agrogenoy in transformation of soil forest-steppe zone. *Belgorod State University Scientific Bulletin. Series: Natural Sciences*, 2011. V. 15(110). Iss. 16. P. 168–179 (in Russian).
- Lobb D. A., Kachanoski R. G., Miller M. H.* Tillage translocation and tillage erosion on shoulder slope landscape positions measured using ¹³⁷Cs as a tracer. *Canadian Journal of Soil Science*, 1995. V. 75. No. 2. P. 211–218. DOI: 10.4141/cjss95-029.
- Mabit L., Benmansour M., Walling D. E.* Comparative advantages and limitations of the fallout radionuclides ¹³⁷Cs, ²¹⁰Pbex and ⁷Be for assessing soil erosion and sedimentation. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2008. V. 99. Iss. 12. P. 1799–1807. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2008.08.009.
- Markelov M. V.* Modern erosion-accumulative processes in the upper parts of hydrographic network of the forest and forest-steppe zones. Author's abstract of PhD dissertation in geographic sciences. Moscow: Moscow University Press, 2004. 22 p. (in Russian).

Olson K. R., Gennadiyev A. N., Zhidkin A. P., Markelov M. V., Golosov V. N., Lang J. M. Use of magnetic tracer and radio-caesium methods to determine past cropland soil erosion amounts and rates. *Catena*, 2013. V. 104. P. 103–110. DOI: 10.1016/j.catena.2012.10.015.

Ovchinnikov A. Yu. Paleocryogenesis as a factor of differentiation of modern soils and soil cover of the center of East European Plain. Author's abstract of PhD dissertation in biological sciences. Moscow: Moscow University Press, 2009. 24 p. (in Russian).

Porto P., Walling D. E., La Spada C., Callegari G. Validating the use of ¹³⁷CS measurements to derive the slope component of the sediment budget of a small rangeland catchment in southern Italy. *Land Degradation & Development*, 2016. V. 27. Iss. 3. P. 798–810. DOI: 10.1002/ldr.2388.

Quijano L., Beguería S., Gaspar L., Navas A. Estimating erosion rates using ¹³⁷Cs measurements and WATEM/SEDEM in a Mediterranean cultivated field. *Catena*, 2016. V. 138. P. 38–51. DOI: 10.1016/j.catena.2015.11.009.

Shary P. A. Assessment of the relief-soil-plants interlinkages using new methods of geomorphometry. Author's abstract of PhD dissertation, biological sciences. Tolyatti: Publishing of ISSP of Russian Academy of Sciences, 2005. 23 p. (in Russian).

Tarazanova T. V. Diagnostics of the degree of tillage of soils in the zonal range of the European part of Russia. Author's abstract of PhD dissertation in biological sciences. Moscow: MTAА Publishing, 2002. 148 p. (in Russian).

Tishkina E. V., Ivanova N. N. Soil cover of cultivated and intact slopes of balkas in the Kursk oblast. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 5. Geografiya (Lomonosov Geography Journal)*, 2010. V. 6. P. 72–79 (in Russian).

Trofimetz L. N., Panidi E. A., Kochurov B. I., Chaadaeva N. N., Tyapkina A. P., Saraeva A. M., Tarasov A. V., Barkalov A. O., Petelko A. I. Quantitative assessment of erosional soil loss in various areas of the arable slope (Upper Oka Basin). *InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International Conference*. Moscow: Faculty of Geography of MSU, 2023. V. 29. Part 1. P. 361–377 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-361-377.

Trofimetz L. N., Panidi E. A., Lavrusevich A. A. Some features of the radiocaesium method applied to study of soil losses due to erosion on the periglacial area of the Upper Oka basin. *Geomorphologiya*, 2022. V. 53. No. 5. P. 154–161 (in Russian). DOI: 10.31857/S0435428122050170.

Walling D. E., He Q. Improved models for estimating soil erosion rates from cesium-137 measurements. *Journal of Environmental Quality*, 1999. V. 28. No. 2. P. 611–622.