

УДК: 551.4.03:528.067.4

DOI: 10.35595/2414-9179-2024-2-30-192-213

Л. Н. Трофимец<sup>1</sup>, Н. Н. Чаадаева<sup>2</sup>, А. П. Тяпкина<sup>3</sup>, А. М. Сараева<sup>4</sup>, А. В. Тарасов<sup>5</sup>,  
А. О. Баркалов<sup>6</sup>, **А. И. Петелько<sup>7</sup>**, Д. П. Бляхарский<sup>8</sup>

## КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ПОТЕРЬ ПОЧВЫ ВСЛЕДСТВИЕ ВОДНОЙ ЭРОЗИИ НА СИЛЬНОВЫПАХАННЫХ ПОЧВАХ БАСЕЙНА ВЕРХНЕЙ ОКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

### АННОТАЦИЯ

В работе приводятся результаты изучения потерь почвы вследствие водной эрозии на участке сельскохозяйственного поля с сильновыпаханными почвами. Исследования проводились на распаханном склоне южной экспозиции на экспериментальном участке, расположенном в Орловском районе Орловской области (бассейн верхней Оки). В исследовании использовался комплекс методов: морфометрический анализ рельефа, радиоцезиевый метод, почвенно-морфологический метод, метод определения легкоразлагаемого органического вещества (ЛОВ) по Ганжаре и Борисову, агрохимические методы. Основу исследований составили авторские данные полевых исследований, проводившихся в 2016–2023 гг. Приводятся карты распределения цезия-137, гумуса, ЛОВ, степени выпханности почв (в баллах по шкале Ганжары и Борисова) для пахотного горизонта 0–25 см. Анализ пространственного распределения активности цезия-137 позволил выделить на участке с сильновыпаханными почвами два расчетных участка, отличающихся уклонами поверхности и характером зависимости активности цезия-137 от площади сбора и знака профильной кривизны. Разработанные полуэмпирические расчетные зависимости для этих участков позволили авторам построить сеточную карту интенсивности смыва почвы (в т/га/год). Интенсивность смыва почвы на участке с сильновыпаханными почвами составила от 5 до более чем 20 т/га/г. Алгоритм расчета интенсивности доставки почвы за пределы участка, разработанный на основе данных послонного отбора проб почвы в устье ложбины, выносящей почву с участка с сильновыпаханными почвами, показал, что с 1 га водосбора ложбины выносятся за пределы водосбора 4,7–6,5 т почвы в год. Остальная часть смываемой почвы переоткладывается на участках аккумуляции в пределах водосбора. Авторы рекомендуют верифицировать полученные выводы на других участках сельскохозяйственного поля. Предложенная методика оценки потерь почвы, разработанная для сильно выпханых участков сельскохозяйственного поля, требует уточнения за счет укрупнения масштаба исследования.

<sup>1</sup> Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева, Институт естественных наук и биотехнологии, ул. Комсомольская, д. 95, Орел, Россия, 302026, *e-mail*: **trofimetc\_1\_n@mail.ru**

<sup>2</sup> Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева, Институт естественных наук и биотехнологии, ул. Комсомольская, д. 95, Орел, Россия, 302026, *e-mail*: **n.chaadaeva@list.ru**

<sup>3</sup> Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева, Институт естественных наук и биотехнологии, ул. Комсомольская, д. 95, Орел, Россия, 302026, *e-mail*: **angelikpt@mail.ru**

<sup>4</sup> Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева, Институт естественных наук и биотехнологии, ул. Комсомольская, д. 95, Орел, Россия, 302026, *e-mail*: **amsaraeva-osu@yandex.ru**

<sup>5</sup> Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева, Медицинский институт, кафедра внутренних болезней, ул. Комсомольская, д. 95, Орел, Россия, 302026, *e-mail*: **arcorel@yandex.ru**

<sup>6</sup> Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева, Институт естественных наук и биотехнологии, ул. Комсомольская, д. 95, Орел, Россия, 302026, *e-mail*: **7oup@mail.ru**

<sup>7</sup> Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН, ул. Семашко, д. 2а, Мценск, Россия, 303035, *e-mail*: **zaglos@mail.ru**

<sup>8</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, кафедра картографии и геоинформатики, 10 линия ВО, д. 33, Санкт-Петербург, Россия, 199178, *e-mail*: **d.blyakharskiy@spbu.ru**

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** сильновыпаханные почвы, легкоразлагаемое органическое вещество, радиоцезиевый метод, интенсивность смыва почвы, ГИС

Lyubov N. Trofimetz<sup>1</sup>, Natalia N. Chaadaeva<sup>2</sup>, Angela P. Tyapkina<sup>3</sup>,  
Anna M. Saraeva<sup>4</sup>, Arkady V. Tarasov<sup>5</sup>, Aleksandr O. Barkalov<sup>6</sup>, Anatoly I. Petelko<sup>7</sup>,  
Dmitry P. Bliakharskii<sup>8</sup>

## QUANTITATIVE ASSESSMENT OF WATER EROSION SOIL LOSSES OF HIGHLY DEGRADED PLOWED SOILS IN UPPER OKA BASIN USING GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS

### ABSTRACT

The paper presents some results of studying soil losses appearing due to water erosion in an agricultural field with highly degraded plowed soils. The research was carried out on the arable slope of the southern exposure in an experimental area located in the Oryol district of the Oryol Region (upper Oka basin). A set of methods was used: morphometric analysis of the topography relief, radiocaesium method, soil-morphological method, method for determining easily decomposable organic matter (labile organic matter) designed according to Ganzhara and Borisov, agrochemical methods. The study was based upon the authors' in-situ data of 2016–2023. Maps are compiled to show the caesium-137, humus and labile organic matter spatial distribution, and of the soil degradation degree (in points on the Ganzhara and Borisov scale) in the arable horizon of 0–25 cm. Analysis of the caesium-137 radioactivity spatial distribution made it possible to identify two sectors in an area of highly degraded plowed soil, which differ in surface slope values and in nature of the caesium-137 radioactivity interdependences with catchment area and sign of profile curvature. Developed semi-empirical computational dependences for the delineated sectors allow to compile a gridded map of the soil runoff intensity (in t/ha/year). The intensity of soil runoff in the area with highly degraded plowed soils is ranged from 5 to more than 20 t/ha/year. The algorithm for the intensity of soil delivery outside of the studied area was developed on the basis of layer-by-layer soil sampling data collected in the mouth of the ravine, removing soil from the highly degraded plowed soil area. The algorithm showed that 4.7–6.5 tons of soil per year are removed from 1 hectare of the catchment area basin. The rest of the outwashed soil material is deposited in accumulation areas within the catchment area basin. The authors recommend verifying the findings in other areas of the agricultural field. The proposed methodology for soil loss estimation, developed for highly degraded plowed soil areas in an agricultural field, requires clarification by enlarging the scale of the study.

<sup>1</sup> Orel State University, Institute of Natural Sciences and Biotechnology, 95, Komsomolskaya str., Orel, 302026, Russia, *e-mail*: [trofimetc\\_1\\_n@mail.ru](mailto:trofimetc_1_n@mail.ru)

<sup>2</sup> Orel State University, Institute of Natural Sciences and Biotechnology, 95, Komsomolskaya str., Orel, 302026, Russia, *e-mail*: [n.chaadaeva@list.ru](mailto:n.chaadaeva@list.ru)

<sup>3</sup> Orel State University, Institute of Natural Sciences and Biotechnology, 95, Komsomolskaya str., Orel, 302026, Russia, *e-mail*: [angelikpt@mail.ru](mailto:angelikpt@mail.ru)

<sup>4</sup> Orel State University, Institute of Natural Sciences and Biotechnology, 95, Komsomolskaya str., Orel, 302026, Russia, *e-mail*: [amsaraeva-osu@yandex.ru](mailto:amsaraeva-osu@yandex.ru)

<sup>5</sup> Orel State University, Medical Institute, Department of Internal Medicine, 95, Komsomolskaya str., Orel, 302026, Russia, *e-mail*: [arcorel@yandex.ru](mailto:arcorel@yandex.ru)

<sup>6</sup> Orel State University, Institute of Natural Sciences and Biotechnology, 95, Komsomolskaya str., Orel, 302026, Russia, *e-mail*: [7oup@mail.ru](mailto:7oup@mail.ru)

<sup>7</sup> Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, 2a, Semashko str., Mtsensk, 303035, Russia, *e-mail*: [zaglos@mail.ru](mailto:zaglos@mail.ru)

<sup>8</sup> Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Department of Cartography and Geoinformatics, 10th line VO, 33, 199178, St. Petersburg, Russia, *e-mail*: [d.blyakharskiy@spbu.ru](mailto:d.blyakharskiy@spbu.ru)

**KEYWORDS:** heavily plowed soils, easily decomposable organic matter, radiocaesium method, soil runoff intensity, GIS

## ВВЕДЕНИЕ

Известно, что обеспеченность пашней в расчете на душу населения нашей страны уменьшается ввиду того, что часть земель отводится для нужд промышленности, населенных пунктов и пр. Из этого следует, что гектар земли с каждым годом должен давать все больше продукции, а следовательно, необходимо из года в год повышать плодородие почв. В результате водной эрозии ежегодно снижается почвенное плодородие. По данным американских почвоведов, из-за эрозии почвы потери питательных веществ примерно в 60 р. больше количества веществ, которые вносятся с удобрениями. При смыве слоя почвы в 18 см пропадает то, что создано природой за 1 400–7 000 лет [Беннет, 1958].

Объем энергетического биоматериала, который обеспечивает многие почвенные процессы, зависит от растительных остатков (опада), вовлекаемых в процесс почвообразования. Опад — это пожнивные остатки, корни сельскохозяйственных культур. Важны также корневые выделения. В их состав входят многие органические вещества (аминокислоты, ферменты, витамины и др.), формирующие плодородие почв. При высокой культуре земледелия уменьшаются потери почвы вследствие эрозии, а большие урожаи обогащают почвы. Культурные биоценозы активно участвуют в формировании плодородия почв.

В последние годы выросло внимание к структурному состоянию почвы. Как утверждает Кирюшин [2013], «важнейшим условием, определяющим структурное состояние почвы, является поступление в нее лабильного органического вещества». Следует заметить, что в настоящее время в номенклатурной схеме лабильного органического вещества рекомендуется выделять как легкоразлагаемое органическое вещество (ЛОВ), так и подвижное органическое вещество (ПОВ) [Мамонтов и др., 2020]. Эти две группы веществ различаются между собой составом, свойствами и способами экстрагирования.

Структурное состояние почвы определяет возможности минимизации обработки почвы. Есть данные, что непроизводительные потери влаги можно сократить на 50–70 мм при сохранении в почве измельченной соломы, остающейся после уборки кукурузы, сорго, т. е. при создании благоприятных условий накопления влаги в структурных почвах с невысокой плотностью сложения [Кирюшин, 2013].

Поступление послеуборочных остатков на полях с посевами озимых культур по разным данным (табл. 1) колеблется в пределах 2–5 т/га [Кирюшин, 1996]. Если расположить культуры в порядке убывания поступления количества их пожнивных остатков в почву, то выстроится следующая последовательность [Кирюшин, 2013]: «многолетние травы – кукуруза на силос – озимые зерновые – яровые зерновые – зернобобовые – сахарная и кормовая свекла – картофель – лен-долгунец». От поступления послеуборочных остатков зависит баланс гумуса. Если под многолетними травами баланс гумуса может быть оценен как благополучный, то под зерновыми происходит его уменьшение. По Кирюшину, при возделывании зерновых (например, на южных черноземах) потери гумуса составляют 0,2–0,4 т/га [Кирюшин, 2000].

При оценке качества органического вещества почвы многие ученые в последние годы обращают внимание не только на состав гумуса, определенный на основе метода И. В. Тюрина (и его модификаций), но также на соотношение в органическом веществе группы устойчивых (консервативных) веществ и группы лабильных (легкоразлагаемых) соединений. Фракционно-групповой состав гумуса устойчив, он определяет показатели почв, которые формировались длительное время и сохраняются в вековых циклах [Долгополова, 1948; Борисов, 2008]. Это зрелые гумусовые кислоты почвы и другие органоминеральные вещества, которые существуют в почве сотни и тысячи лет. Они медленно

минерализуются, определяя типовые признаки почвы. Скорость же обновления легкоразлагаемых органических веществ измеряется годами и десятками лет. Эта группа включает неразложившиеся органические остатки и другие соединения, «новообразованные гуминовые и фульвокислоты, непрочно связанные с минеральной частью почвы» [Борисов, 2008]. Группа лабильных органических веществ (неразложившиеся органические остатки растительного и животного происхождения) принимает существенное участие в биологической активности почв, в сорбции и накоплении радионуклидов и других загрязняющих веществ. Выпаханные почвы, по мнению Борисова, являются наиболее распространенным видом деградации почв.

Табл. 1. Количество послеуборочных остатков, поступающих в пахотный слой почвы, тонн сухого вещества на 1 га  
Table 1. The amount of post-harvest residues decomposed in the arable soil layer, ton of dry matter per 1 ha

Культура	В. А. Демин (1989)	Л. Л. Шишов (1989)	А. А. Титлянова (1992)	Н. Ф. Ганжара (1989)
Озимая пшеница, озимая рожь	2,5–3,2	2,2–5,4	2,8–6,5	2,0–3,2
Ячмень	2,5	2,0–4,0	1,7–4,5	2,0–3,2

На участках полей с выпашанными почвами устойчивое снижение содержания гумуса (на 15–40 % ниже исходного) отмечается уже через 30 лет. В том случае, если содержание гумуса снижается на 40–60 %, вероятнее всего следует говорить об эрозионных потерях [Таразанова, 2002].

В 1960-х гг. внимание к структурному состоянию почвы ослабло [Таразанова, 2002]. В период перехода России к рыночной экономике ситуация на сельскохозяйственных полях ухудшилась из-за недостаточного внесения органических удобрений и несохранения в почве послеуборочных остатков. Почвы приобрели черты выпашанности [Гумматов и др., 1992], т. е. черты обесструктурирования пахотного горизонта.

В России, начиная с 1991 г., на многие (по данным некоторых авторов, на все) сельскохозяйственные поля, особенно на удаленные от центральных усадеб, не вносились не только органические, но и минеральные удобрения. В связи с этим появились огромные ареалы выпашанных почв. Как протекают эрозионные процессы на выпашанных почвах, до сих пор не совсем ясно. Изучение эрозионных процессов на участках выпашанных почв (как эрозионнонеустойчивых [Борисов, 2008]) сегодня как никогда актуально.

Только в последние годы постепенно в планы центров химизации и сельскохозяйственной радиологии стали включать определение содержания в почве ЛОВ. Эти работы пока делаются в рамках коммерческих договоров. Отсюда становится ясно, что исследования, направленные на изучение водной эрозии на участках, в разной степени обогащенных растительными остатками (т. е. на участках полей с почвами разной степени выпашанности), сегодня актуальны и своевременны.

Цель настоящего исследования — изучить возможности применения радиоцезиевого метода [Маркелов, 2004; Голосов и др., 2022; Трофимец и др., 2023; Walling, He, 1999] и морфометрических показателей рельефа к установлению потерь почвы вследствие водной эрозии на выпашанных серых лесных почвах в пределах экспериментального участка сельскохозяйственного поля (рис. 1). В качестве приоритетных задач были поставлены следующие:

- 1) исследовать особенности пространственного распределения в пахотном горизонте гумуса и цезия-137;
- 2) исследовать особенности пространственного распределения на склоновой поверхности в пахотном слое ЛОВ;
- 3) создать слои геоинформационной системы (ГИС), отражающие содержание в пахотном слое гумуса, цезия-137, ЛОВ, морфометрические показатели рельефа для изучаемого участка;
- 4) обосновать выделение расчетных участков, отличающихся по условиям протекания водной эрозии на сильно выпаханных почвах;
- 5) разработать расчетные зависимости активности цезия-137 от морфометрических показателей рельефа для выделенных участков с сильновыпаханными почвами;
- 6) рассчитать интенсивность потерь почвы вследствие водной эрозии для участков с сильновыпаханными почвами;
- 7) построить сеточную карту смыва почвы для участка склоновой поверхности с сильновыпаханными почвами.

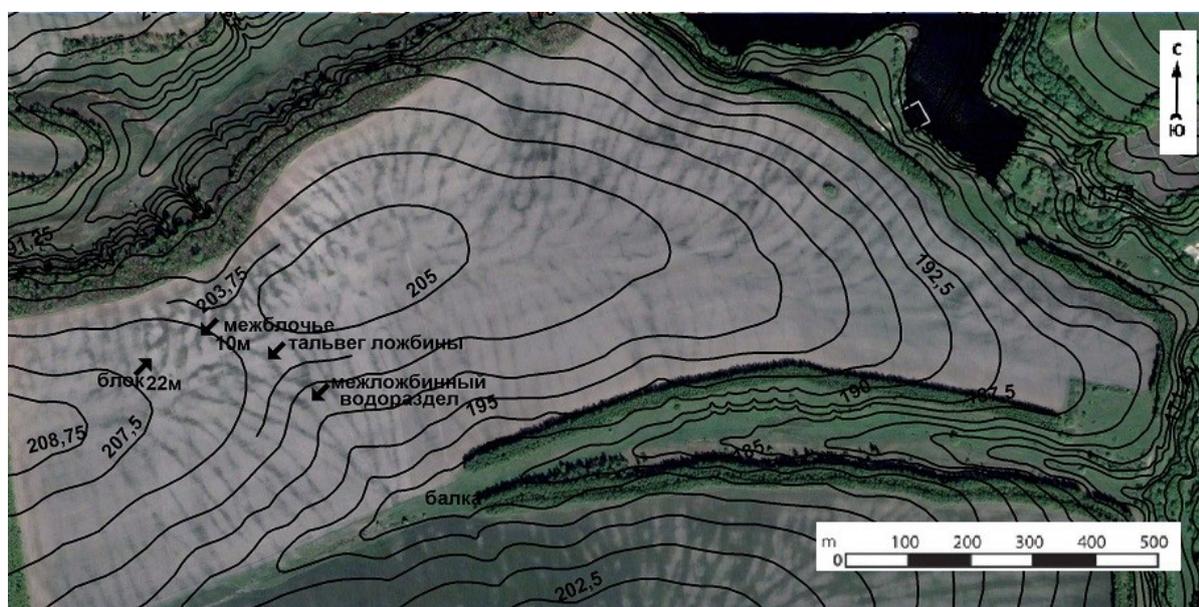


Рис. 1. Спутниковый снимок экспериментального участка сельскохозяйственного поля с элементами полигонально-блочного и ложбинного рельефа. Quickbird, дата съемки 16.05.2003, доступен для просмотра в Google Earth™  
Fig. 1. Satellite image of an experimental area in an agricultural field with elements of polygonal-block and ravine topography. Quickbird, collection date 16.05.2003, available for visual study Google Earth™

В последние годы в развитых странах получило распространение координатное (точное или прецизионное) земледелие. Его основу составляет внедрение технологий, базирующихся на дифференцировании полей на отдельные участки, различающиеся по агрономическим свойствам. Принцип точного земледелия заключается в применении на каждом участке поля различных технологий. Внедрение принципов точного земледелия требует знания агрохимических свойств почв на каждом элементарном участке сельскохозяйственного поля. Отсюда видна актуальность исследований, направленных на разработку принципов дифференцированного подхода к делению сельскохозяйственного поля на участки, отличающиеся по показателям плодородия почв.

Почвы на экспериментальном участке сельскохозяйственного поля, на котором авторами в 2016 г., предположительно, были обнаружены выпаханые почвы (участки поля с, предположительно, выпаханными почвами были обнаружены при анализе спутникового снимка сверхвысокого (~0,5 м/пикс)<sup>1</sup> пространственного разрешения), были подвергнуты комплексному изучению. В 2022–2023 гг. были отобраны пробы почвы из пахотного горизонта 0–25 см на цезий-137, гумус, легкоразлагаемое органическое вещество. Всего было отобрано 40 проб почвы на четырех позициях склоновой поверхности. Пробы отбирались у основания склона южной экспозиции, на водораздельной поверхности, на участке с предположительно выпаханными почвами и на участке, соседнем с участком выпаханных почв (рис. 2). Пробы почвы были подвергнуты агрохимическому анализу, гамма-спектрометрическому анализу, анализу на содержание ЛОВ.

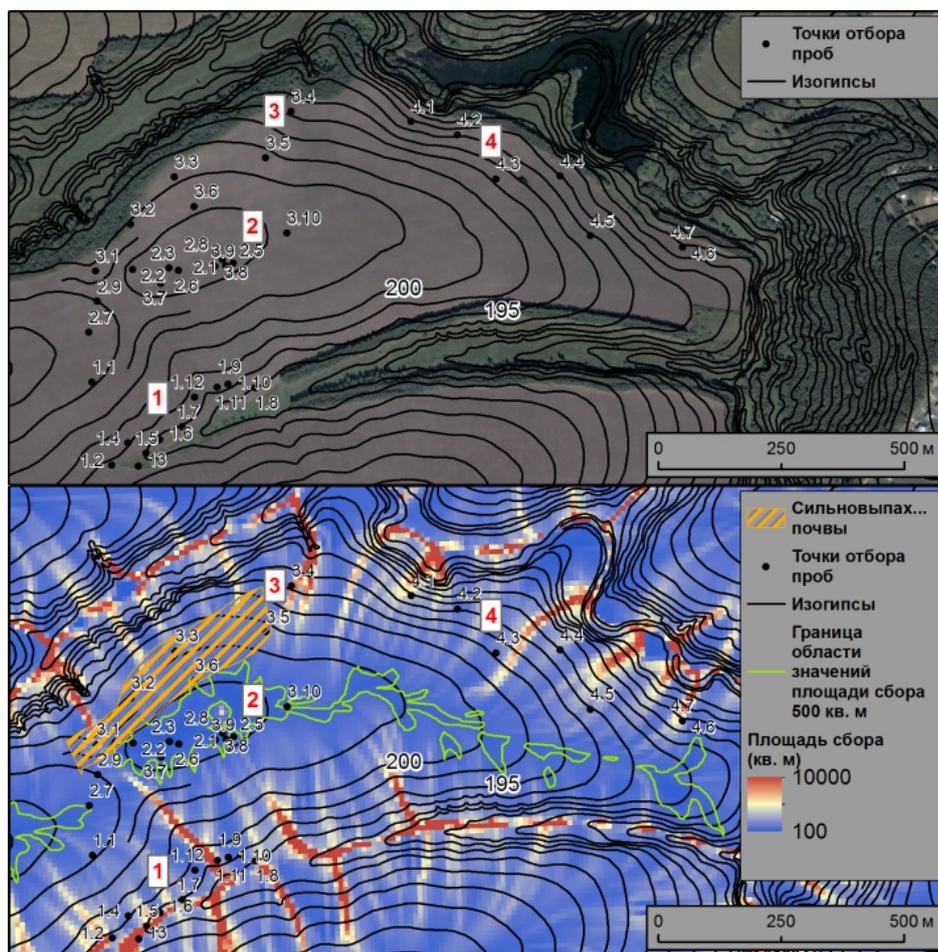


Рис. 2. Точки отбора проб почвы на спутниковом снимке (сверху) и на карте площади сбора (снизу). 1–4 — участки отбора проб на гумус, цезий-137, ЛОВ. Штриховкой показан участок с сильновыпаханными почвами (предполагаемая граница до 2023 г.)  
 Fig. 2. Soil sampling points on the satellite image (top) and on the catchment area map (bottom). 1–4 — sampling plots (sampling for humus, caesium-137, labile organic matter). The hatching shows a plot with highly degraded plowed soils (the estimated boundary before 2023)

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

В результате предположение авторов подтвердилось. Анализ на ЛОВ, проведенный в Тимирязевской академии под руководством Б. А. Борисова, показал, что участки поля отличаются по степени выпаханности почв. На участке со значением выпаханности почв более 15 баллов (сильновыпаханные почвы по Ганжаре и Борисову) было решено провести исследование радиоцезиевым методом потерь почвы вследствие водной эрозии. Была выдвинута гипотеза, что ранее обнаруженные (в 2016 г.) сниженные значения активности цезия-137 свидетельствуют о том, что на сильновыпаханных почвах потери почвы вследствие водной эрозии больше, чем на соседних участках с почвами средней и ниже средней степени выпаханности. Отбор проб почвы вдоль катен, пересекающих участок с выпаханностями почвами, построение зависимостей активности цезия-137 от морфометрических показателей рельефа (площади сбора и профильной кривизны) позволили получить полуэмпирическую количественную зависимость. Эта зависимость позволила построить сеточную карту интенсивности потерь почвы (т/га/год) за период с 1986 г. по настоящее время. Оказалось, что смыв почвы на участке с сильновыпаханными почвами изменяется от 5 (на участках аккумуляции, диагностируемых отрицательным знаком профильной кривизны) до более чем 20 т/га/год на остальной территории участка.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования в статье является участок сельскохозяйственного поля на склоне балки южной экспозиции (рис. 1). Сельскохозяйственное поле расположено в бассейне р. Сухая Орлица (левый приток р. Оки). Расположен участок в 20 км от г. Орла. Склоны долины реки используются под пашню. Высеваются зерновые культуры, как озимые, так и яровые. Долина реки расположена в пределах лесостепной зоны Восточно-Европейской равнины. Рельеф отличается наличием овражно-балочных комплексов. Абсолютные отметки изменяются [Атлас Орловской области, 2000] от 208,75 м до 185 м. Исследуемая территория относится к участкам Русской равнины с комплексами форм рельефа, свойственными некогда существовавшей здесь перигляциальной области. В частности, как видно на спутниковом снимке сверхвысокого пространственного разрешения (рис. 1), на склоновой поверхности можно отметить чередование ложбин и межложбинных водоразделов. На водораздельной поверхности обнаружены элементы полигонально-блочного микрорельефа (блоки и межблочные понижения размером 15–23 м и 7–15 м соответственно). Следует отметить, что не все исследователи соглашались с утверждением наличия элементов полигонально-блочного рельефа на территории Русской равнины. Например, П. А. Шарый [2005] утверждает, что на всей территории Русской равнины не обнаруживается цикличность в чередовании блочных повышений и межблочных понижений. П. А. Овчинниковым [2009] такие формы рельефа исследованы на территории соседней с Орловской Курской области. Автор показал, что почва на блочных повышениях отличается от почвы межблочных понижений. Почва может считаться «нормальной» (по Докучаеву) только в области блочных повышений, где она залегает «на месте своего образования».

На территории Орловской области исследования, подобные тем, что проводили ученые под руководством В. М. Алифанова [Алифанов и др., 2010], не организовывались. Однако несомненно, что именно на блочных повышениях находятся несмытые или слабосмытые почвы. Авторами настоящей статьи ранее была обоснована важность учета полигонально-блочного строения водораздельной поверхности при назначении опорных площадок при применении радиоцезиевого метода для расчета потерь почвы в результате водной эрозии [Трофимец и др., 2022]. Этот подход был сохранен при проведении настоящих исследований.

На обсуждаемом в статье экспериментальном полигоне участки с сильновыпаханными почвами были обнаружены на расстоянии до 50 м от края поля (рис. 3). Такой участок, обнаруженный на склоне южной экспозиции, характеризуется уклонами от 2° до 8° (рис. 3). Известно, что со склонов крутизной в 1°–2° «смывается до десяти-двадцати м<sup>3</sup> почвы с гектара» [Карпачевский, 1983]. Содержания же питательных веществ в 10–15 м<sup>3</sup> почвы достаточно для производства урожая пшеницы в 30 ц/га [Карпачевский, 1983]. Отсюда и несомненная важность изучения водной эрозии на сильновыпаханных почвах. Оценка степени выпашанности почв производилась по методу, предложенному Ганжарой и Борисовым, в Тимирязевской академии под руководством Б. А. Борисова [2008].

Результаты анализа почв на содержание ЛОВ показали, что почвы на экспериментальном участке сельскохозяйственного поля являются в разной степени выпашанными. Обсуждаемый в статье участок с сильновыпаханными почвами (степень выпашанности более 15 баллов) отличается от остальных участков со средневыхпашанными почвами (10–15 баллов), слабовыхпашанными (5–10 баллов), очень слабовыхпашанными (0,1–5 баллов). Участок с очень слабовыхпашанными почвами был обнаружен лишь на водораздельной поверхности. Слабовыхпашанные почвы были обнаружены в нижней части склоновой поверхности, средневыхпашанные почвы — в части склоновой поверхности, расположенной в верхней части склона вдоль периметра поля (рис. 9). Как следует из этого анализа, вся поверхность поля в пределах экспериментального полигона должна быть поделена на относительно однородные (по условиям формирования почв с разной продуктивностью) участки.

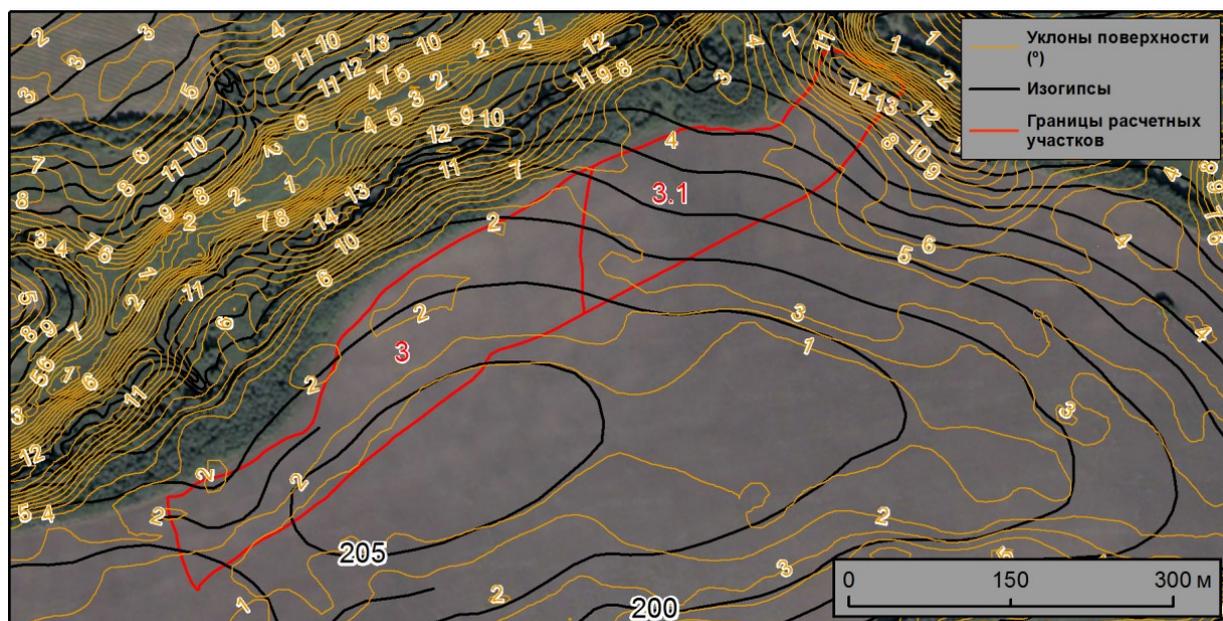


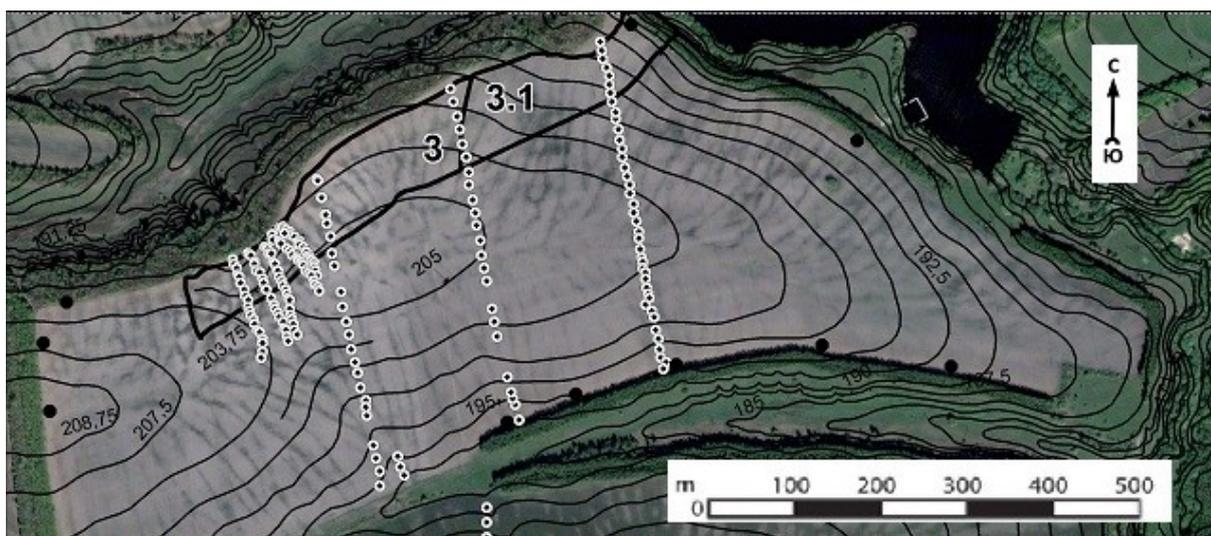
Рис. 3. Уклоны на склоновой поверхности. 3, 3.1 — номера расчетных районов, выделенных на участке с сильно выпашанными почвами

Fig. 3. Slopes on a sloping surface. 3, 3.1 — numbers of sectors allocated in an area of highly degraded plowed soils

Для количественной оценки потерь почвы в пределах ареала выпашанных почв были произведены измерения активности цезия-137 как интегрально в пахотном слое 0–25 см вдоль катен, расположенных вдоль падения склона, так и послойно, в точках, расположенных по периметру поля. Участок с выпашанными почвами был перекрыт 8

катенами (рис. 4). Кроме этих точек в расчетах использовались точки, в которых были отобраны пробы почвы для анализа на содержание легкоразлагаемого органического вещества (рис. 2). Каждая проба почвы, отобранная в точке, подвергалась гамма-спектрометрическому анализу на аппарате УСК «Гамма Плюс». Учитывалось, что предел обнаружения цезия-137 в почве на УСК «Гамма Плюс» — 3 Бк/пробу<sup>1</sup>. Погрешность определения цезия-137 — до 40 %<sup>2</sup>.

В ходе анализа спутникового снимка сверхвысокого пространственного разрешения, карт рельефа, крутизны, площади сбора [Шарый, 2005; Costa-Cabral, Burges, 1994] и профильной кривизны [Evans, 1972] (рис. 5), а также активности цезия-137 (он выступал маркером степени смытости почв) склоновая поверхность в пределах выпаханых почв была дифференцирована на расчетные участки, отличающиеся по характеру зависимости активности цезия-137 от морфометрических показателей рельефа. В настоящей статье обсуждается участок № 3, расположенный в пределах склоновой поверхности с крутизной от 2° до более 6° (рис. 3). Подробный анализ карты уклонов поверхности, карт площади сбора и профильной кривизны (рис. 3–5) привел к заключению о необходимости выделения в пределах участка № 3 двух участков — 3 и 3.1. Участок № 3.1 отличается более высокой крутизной (от 3° до более чем 6° на восточной его окраине). Участок № 3 более пологий (уклоны изменяются от 1° до 3°) (рис. 3).



*Рис. 4. Катены на участке с выпаханными почвами и точки послойного отбора проб почвы (черные пунсоны) по периметру экспериментального участка на склоне южной экспозиции*

*Fig. 4. Catenas in the area of highly degraded plowed soils and plots of layer-by-layer soil sampling (black markers) along the perimeter of the experimental area on the slope of the southern exposure*

ГИС-слой уклонов, слои площади сбора (рассчитанной по алгоритму DEMON — Digital Elevation Model Networks) [Costa-Cabral, Burges, 1994] и профильной кривизны [Evans, 1972] были построены с использованием инструментов ГИС SAGA и цифровой

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

<sup>2</sup> ГОСТ Р 54038-2010. Почвы. Методика определения <sup>137</sup>Cs в почвах сельхозугодий. Применяется с 01.01. 2012

модели рельефа в м-бе 1: 10 000 в качестве основы. Площадь сбора была рассчитана в ГИС SAGA. Алгоритм предполагает расчет направления тока в каждой ячейке сеточной цифровой модели рельефа (DEM) на основе локальной экспозиции склона, вычисляемой с шагом (по азимуту) в  $1^\circ$ . Поток через каждую ячейку — это поток, пришедший к этой ячейке, плюс поток, порожденный самой ячейкой. Линии направления тока также рассчитаны в SAGA инструментом Gradient vectors from surface.

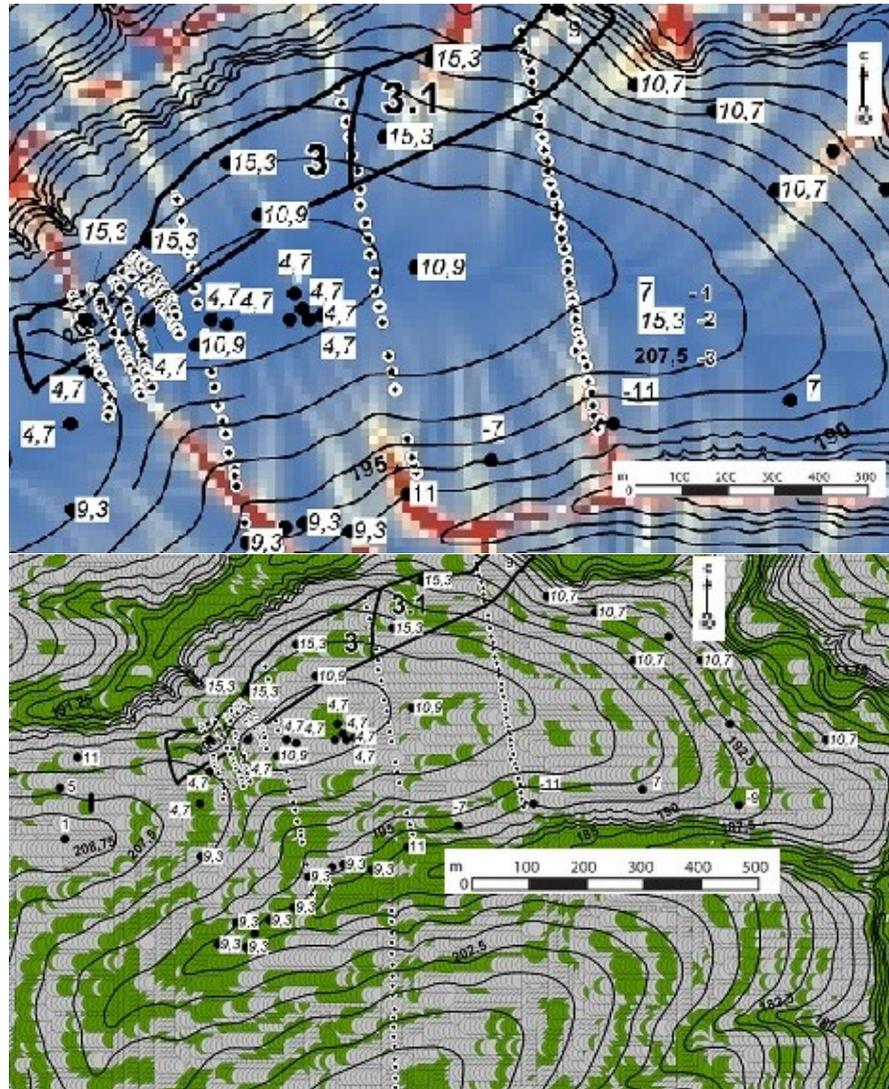


Рис. 5. Точки отбора проб на карте площади сбора (сверху) и карте профильной кривизны (снизу). Пунсоны фиксируют точки отбора (у черных пунсонов подписаны баллы степени выпаханности). 9 — намыто 9 см почвы в точке 26923.2

Fig. 5. Sampling plots on the catchment area map (top) and profile curvature map (bottom). Markers mark the sampling locations (black dots have labels showing the degree degrading due to plowing). 9 — 9 cm of soil layer was inwashed at plot 26923.2

Потребность в дифференцировании поверхности изучаемого участка сельскохозяйственного поля по условиям протекания эрозионных процессов потребовала применения спутниковых снимков сверхвысокого пространственного разрешения и координатного подхода. Каждая точка отбора проб почвы фиксировалась в ходе GPS(GNSS)-съемки с

использованием приемника ГИС-класса (туристического класса) Garmin. Точки накладывались на слои карты м-ба 1: 10 000.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Климат изучаемой территории в последние десятилетия претерпел некоторые изменения. Наблюдается потепление зимнего сезона, также как и на соседних территориях Русской равнины. Вследствие этого сократился весенний сток в водоемы, на реках не наблюдается высокое половодье. Следует, однако, отметить, что эта закономерность нарушается в отдельные годы [Трофимец и др., 2023].

Изучение доставки смытой почвы в балки (рис. 6) показало, что интенсивность смыва почвы в послечернобыльский период снизилась в 1,37 р. На изображении видно, что за период с 1986 по 2016 г. (30 лет) намыто 26 см почвы. За 22-летний период с 1964 г. по 1986 г. (максимум на глубине 44 см) намыто 20 см.

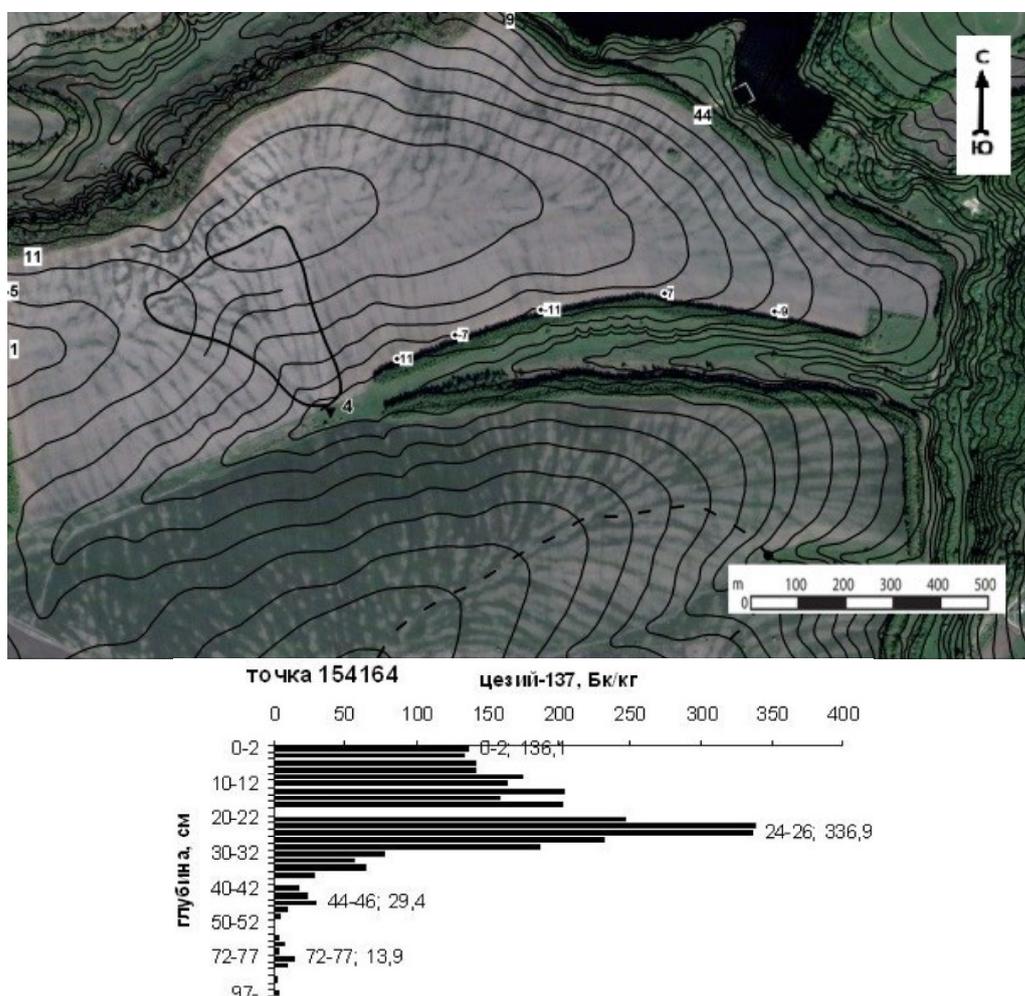


Рис. 6. Сверху — точки послойного отбора проб почвы по глубине, расположенные по периметру поля. 44 — слой намытой почвы, см в точке. Снизу — диаграмма распределения цезия-137 по глубине в точке 4 (в принимающей балке на рис. сверху)

Fig. 6. Top image — the plots of in-depth layer-by-layer soil sampling, located along the perimeter of the studied area. 44 — a layer of inwashed soil, in cm at the point. Bottom image — a diagram of the caesium-137 in depth distribution at plot 4 (in the receiving ravine, showed in the top-side image)

Участок сельскохозяйственного поля, на котором авторами в 2016 г. предположительно были обнаружены выпаханые почвы, в 2022–2023 гг. был подвергнут дополнительному изучению. В 2022 г. были отобраны интегральные пробы почвы вдоль катен. В 2023 г. на разных участках сельскохозяйственного поля были отобраны пробы почвы из пахотного горизонта 0–25 см на цезий-137, гумус, легкоразлагаемое органическое вещество, на механический состав (рис. 2). В 2023 г. были отобраны послойно по глубине пробы почвы в точках, расположенных по периметру сельскохозяйственного поля (рис. 6). Смыв почв с участка № 3.1 был зафиксирован в точке № 26923.2 (9) (рис. 4, 11, 12). Точка оказалась приуроченной к тальвегу ложбины с площадью водосбора 6 382 м<sup>2</sup>.

В результате предположение авторов, сделанное в 2016 г., подтвердилось. Анализ на ЛОВ, проведенный в Тимирязевской академии под руководством Б. А. Борисова, показал, что границы участка с сильновыпаханными почвами расширились (рис. 2, 4). На рис. 2 штриховкой показана ранее выделенная площадь участка с выпаханнами почвами, на рис. 4 — уточненная площадь сильновыпаханных почв, полученная в результате анализа распределения ЛОВ и показателей степени выпаханности почвы. Для этих двух участков (на которых значения выпаханности почв составило более 15 баллов) было решено провести исследование радиоцезиевым методом потерь почвы вследствие водной эрозии. Была выдвинута гипотеза, что ранее (в 2016 г.) обнаруженные сниженные значения активности гумуса (рис. 7) и цезия-137 [Трофимец и др., 2022] свидетельствуют о том, что на сильновыпаханных почвах потери почвы вследствие водной эрозии больше, чем на соседних участках с почвами средней и ниже средней выпаханности.

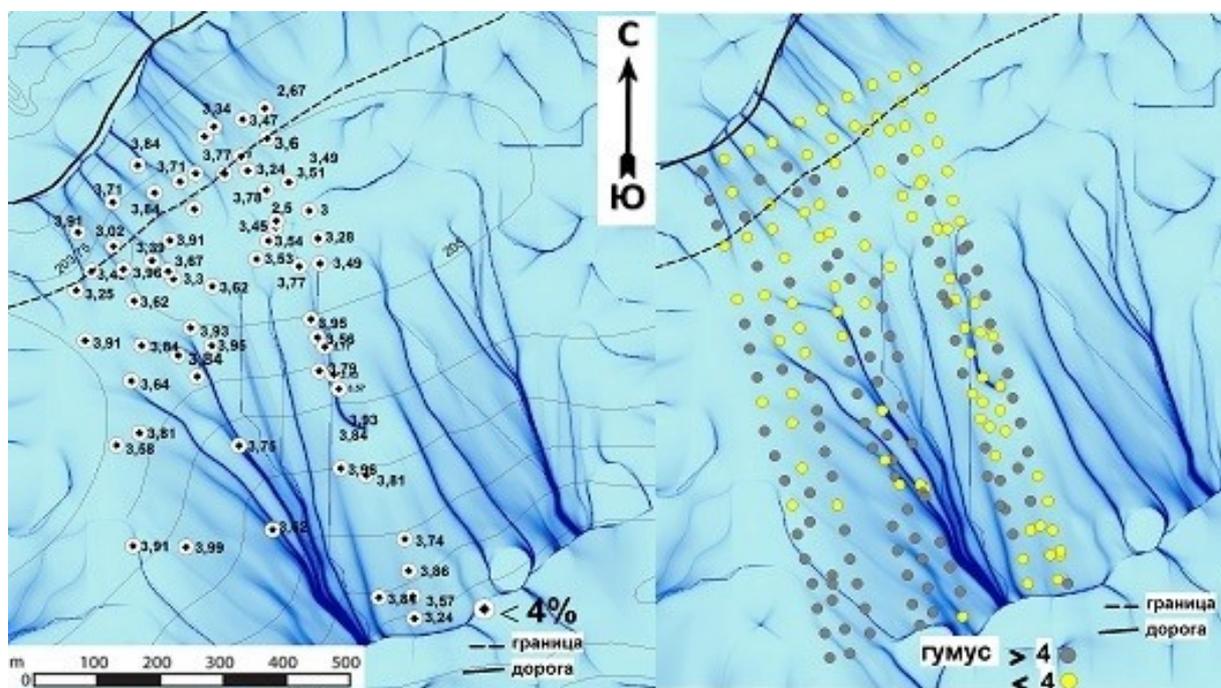


Рис. 7. Фрагмент карты площади сбора со значениями гумуса в пахотном слое (0–25 см). В северной части карты — фрагмент участка с выпаханнами почвами  
 Fig. 7. A fragment of the catchment area map, humus content values in the arable layer (0–25 cm) are marked. There is a fragment of a highly degraded plowed soil area presented in the northern part of the map

Пробы были подвергнуты агрохимическому анализу и анализу на ЛОВ. Оказалось, что если на водораздельной поверхности содержание гумуса 4,83 %, а у основания склона в зоне аккумуляции — 4,65 %, то на участке с сильновыпаханными почвами содержание гумуса снижено на 22,8 % (до 3,73 %, рис. 8). Авторы сделали заключение, что снижение содержания гумуса обязано не водной эрозии, а выпашанности. Содержание ЛОВ (по Ганжаре и Борисову) оказалось самым низким из трех участков (0,36 против 0,98 на водоразделе, рис. 7, 8). Степень выпашанности — самая высокая (15,3 балла против 4,7 балла на водоразделе, рис. 9). Доказано, что почвы на участках 3 и 3.1 могут считаться сильновыпаханными. Вариабельность значений цезия-137 на участке (рис. 9) указывает на наличие эрозионных потерь, обусловленных попаданием точек пробоотбора то на повышения, то в эрозионные борозды и в тальвеги микроложбин.

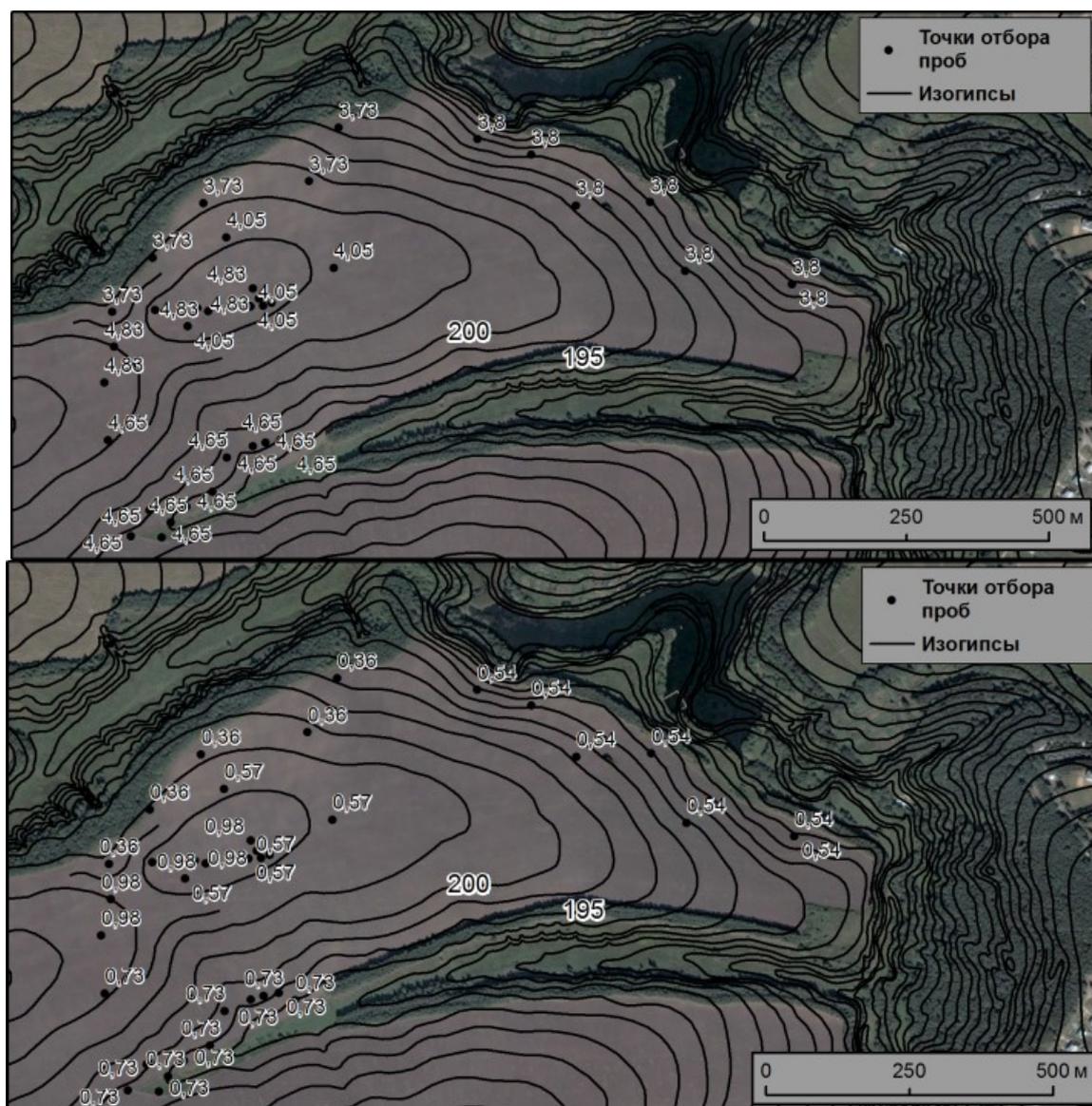
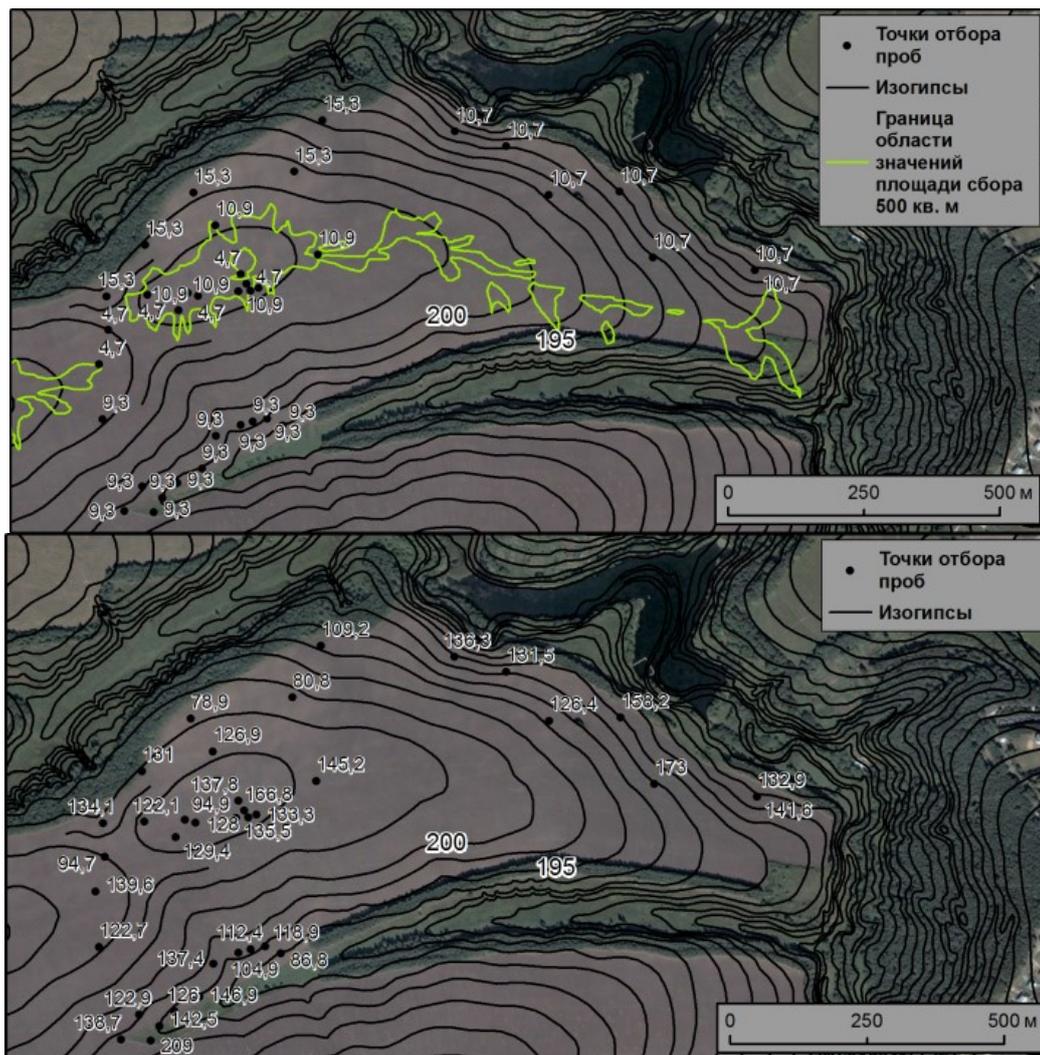


Рис. 8. Сверху — содержание гумуса, %, в точках отбора проб на ЛОВ.

Снизу — содержание ЛОВ

Fig. 8. Top image shows the humus content, %, at the labile organic matter sampling plots.  
Bottom image — labile organic matter content



*Рис. 9. Точки отбора проб с показателем степени выпаханности почв в баллах (сверху) и значениями цезия-137 (снизу) на спутниковом снимке. Контур на водораздельной поверхности фиксирует границу площадей сбора 500 м<sup>2</sup>*

*Fig. 9. Sampling plots with an indicated due-to-the-plowing degradation degree (top) and indicated caesium-137 values (bottom) on the satellite image.*

*The contour on the watershed surface fixes a boundary of the 500 m<sup>2</sup> catchment area*

Нанесение всех точек со значениями цезия-137 на карту площади сбора и карту профильной кривизны показало, что вариабельность значений активности цезия-137 свидетельствует о возможности поиска зависимости активности цезия-137 от таких морфометрических показателей, как площадь сбора и профильная кривизна (рис. 5). Проведение корреляционного и регрессионного анализа позволило установить статистические связи между значениями активности цезия-137 и величинами площади сбора в точках пробоотбора. Учет знака профильной кривизны (отрицательной в зоне аккумуляции и положительной в зоне смыва) позволил уточнить полученные зависимости. В результате были получены полуэмпирические количественные зависимости для двух участков с сильновыпаханными почвами (рис. 10). На карте площади сбора видно, что участок № 3 отличается от участка № 3.1 степенью расчлененности поверхности. Участок № 3 испещрен истоками ложбин. В отличие от него, на участке № 3.1 обнаружена достаточно выраженная ложбина с площадью сбора 6 382 м<sup>2</sup>.

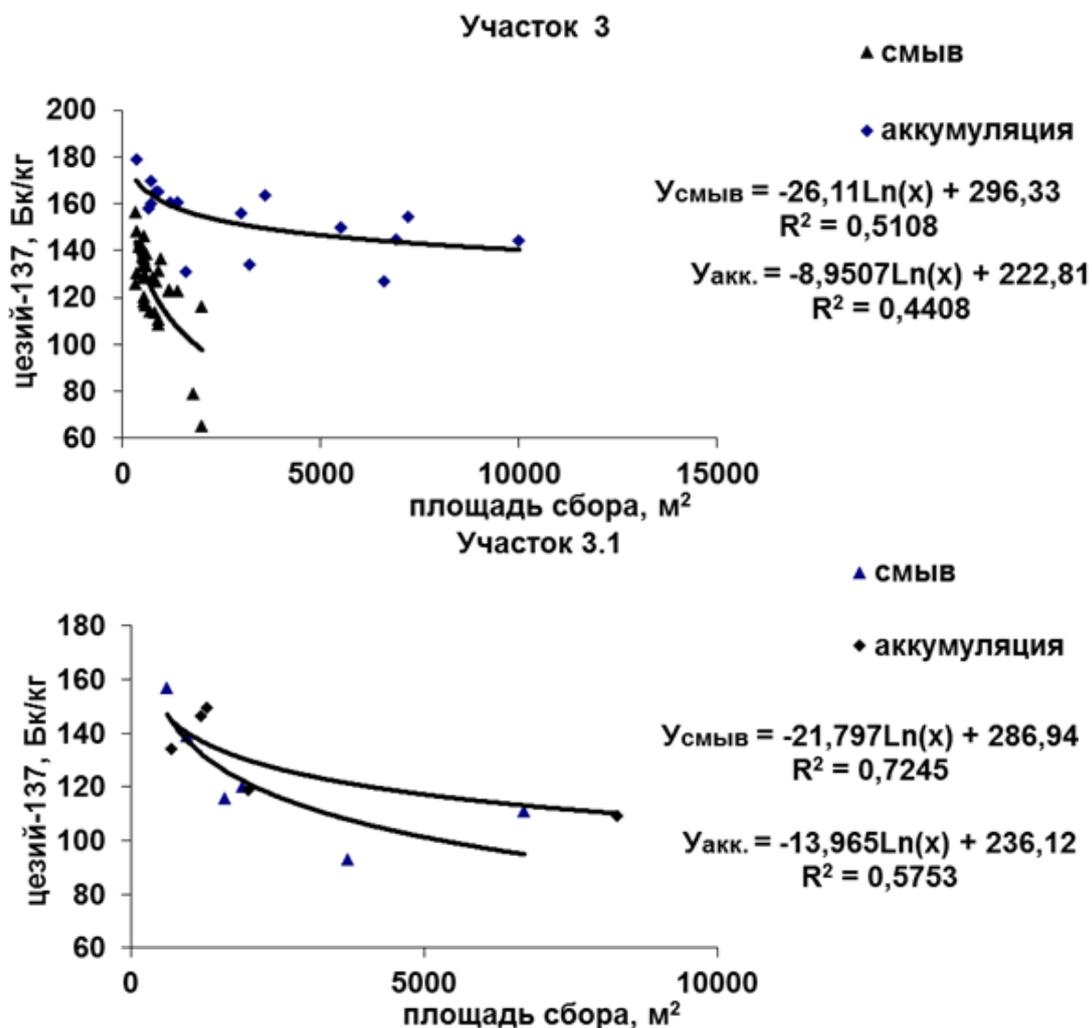


Рис. 10. Расчетные зависимости для участков № 3 и № 3.1  
Fig. 10. Estimated dependencies for sectors No. 3 and No. 3.1

Из табл. 2 видно, что площади сбора для зон смыва на участке № 3 достигают 2 000 м<sup>2</sup>, а диапазон изменения измеренных значений активности цезия-137 — 65,2–158,2 Бк/кг. В зоне аккумуляции площадь сбора достигает 10 000 м<sup>2</sup>, диапазон изменения измеренных значений цезия-137 — 126,7–179,1 Бк/кг. На расчетном участке № 3.1 площади сбора в зоне смыва достигают 6 700 м<sup>2</sup>, диапазон изменения измеренных значений активности цезия-137 — 93–156,8 Бк/кг. В зоне аккумуляции площадь сбора достигает 8 300 м<sup>2</sup> и диапазон изменения измеренных значений активности цезия-137 — 109,2–149,4 Бк/кг.

Можно отметить, что участок № 3, расположенный ближе к водораздельной поверхности, имеет меньшие значения минимальных площадей сбора и в зоне смыва, и в зоне аккумуляции. Зависимости, положенные в основу построения сеточной карты интенсивности смыва почвы (т/га/год) за период с 1986 г. по настоящее время (рис. 13), и анализ этой карты позволили сделать следующие выводы. Смыв почвы на участке с сильновыпаханными почвами изменяется от 5 (на участках аккумуляции, маркируемых отрицательными значениями профильной кривизны) до более чем 20 т/га/год на остальной территории участка. Границу участка сильновыпаханных почв, нарушенных эрозией, авторы проводили по границе, маркируемой низкими значениями активности цезия-137 (не более 140 Бк/кг).

Табл. 2. Диапазоны изменения измеренных площадей сбора и активности цезия-137 на расчетных участках № 3 и № 3.1

Table 2. Ranges of change in the measured catchment area and caesium-137 radioactivity values at the delineated sectors No. 3 and No. 3.1

№ участка	Активность цезия-137, Бк/кг, макс.	Активность цезия-137, Бк/кг, мин.	Площадь сбора, макс.	Площадь сбора, мин.
3	Зона смыва			
	158,2	65,2	2000	340
	Зона аккумуляции			
	179,1	126,7	10000	360
3.1	Зона смыва			
	156,8	93	6700	617
	Зона аккумуляции			
	149,4	109,2	8300	680

Дополнительно авторы исследовали интенсивность доставки смывой с водосбора ложбины почвы за пределы поля. На участке № 3.1 в точке, расположенной на краю поля, послойно была отобрана почва. Доставка почвы в эту точку за 37 лет (с 1986 по 2023 гг.) составила 34 см (рис. 11). Как видно на изображении, сверх пахотного горизонта (25 см) отложился слой почвы 9 см. Подпись «9» далее идентифицирует точку 26923.2 на картах. Следует заметить, что ложбину удалось наилучшим образом идентифицировать только по значениям площади сбора на соответствующей карте (рис. 11, справа). На рис. 11 видно, что визуальными изогипсами на топографической карте не позволяют установить местоположение ложбины, чего нельзя сказать о значениях площадей сбора на соответствующей карте.

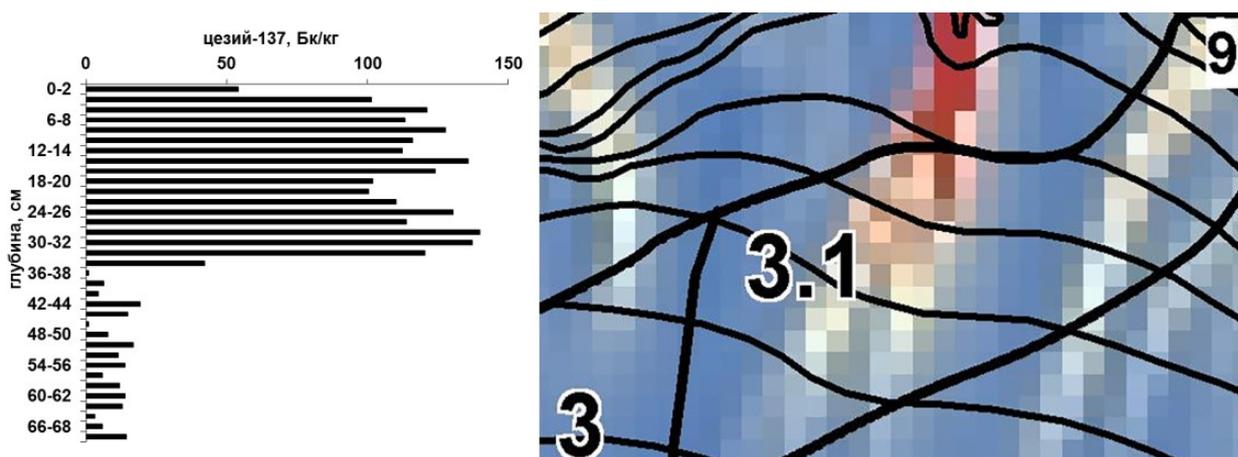


Рис. 11. Слева — диаграмма распределения по глубине активности цезия-137 в точке 26923.2 (9). Справа — ложбина, в устьевой части которой (9) послойно отбиралась почва

Fig. 11. A diagram of the caesium-137 radioactivity in-depth distribution at plot 26923.2 (9) (left image). A ravine, in the mouth of which (9) the soil was sampled layer-by-layer (right)

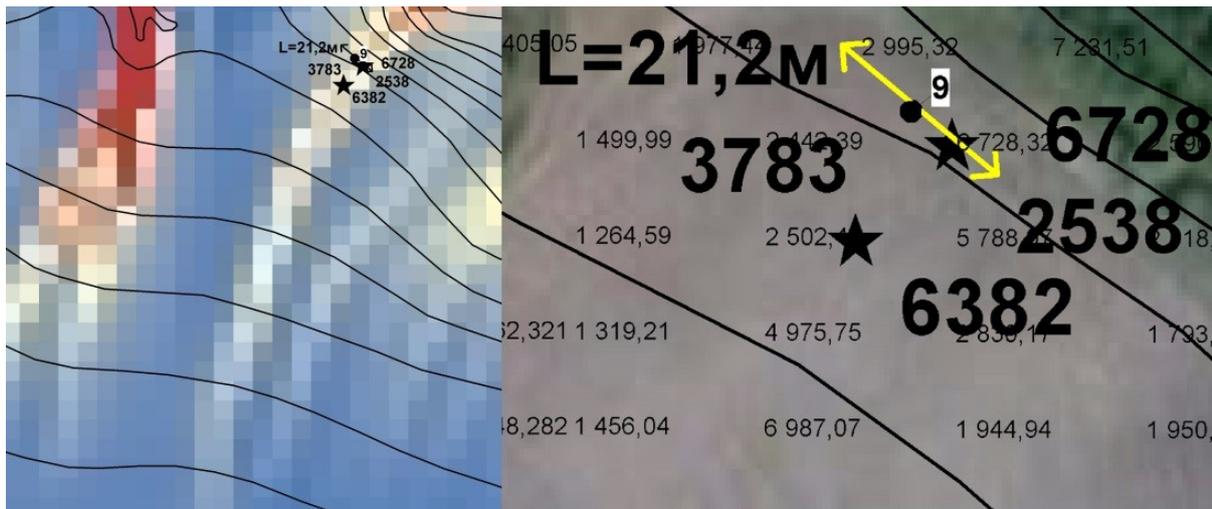


Рис. 12. Точка послойного пробоотбора 26923.2 (9) на карте площади сбора (слева) и на спутниковом снимке (справа). 6382 — площадь сбора (м<sup>2</sup>) выше точки (площадь водосбора ложбины); 6728 — ниже точки; 3783 и 2538 — площади левого и правого притоков ложбины. Стрелка показывает ширину тела аккумуляции (21,2 м).

Расстояние по диагонали между узлами карты площади сбора (звездочки) — 14 м  
 Fig. 12. The 26923.2 (9) plot of layer-by-layer soil sampling on the map of catchment area (left image) and on the satellite image (right image). 6382 — is the catchment area (m<sup>2</sup>) above the plot (the catchment area of the ravine); 6728 — below the plot; 3783 and 2538 — are the areas of the left and right tributaries of the ravine. The arrow shows the accumulation body width (21.2 m). The diagonal distance between the nodes of the catchment area map (asterisks) is 14 m

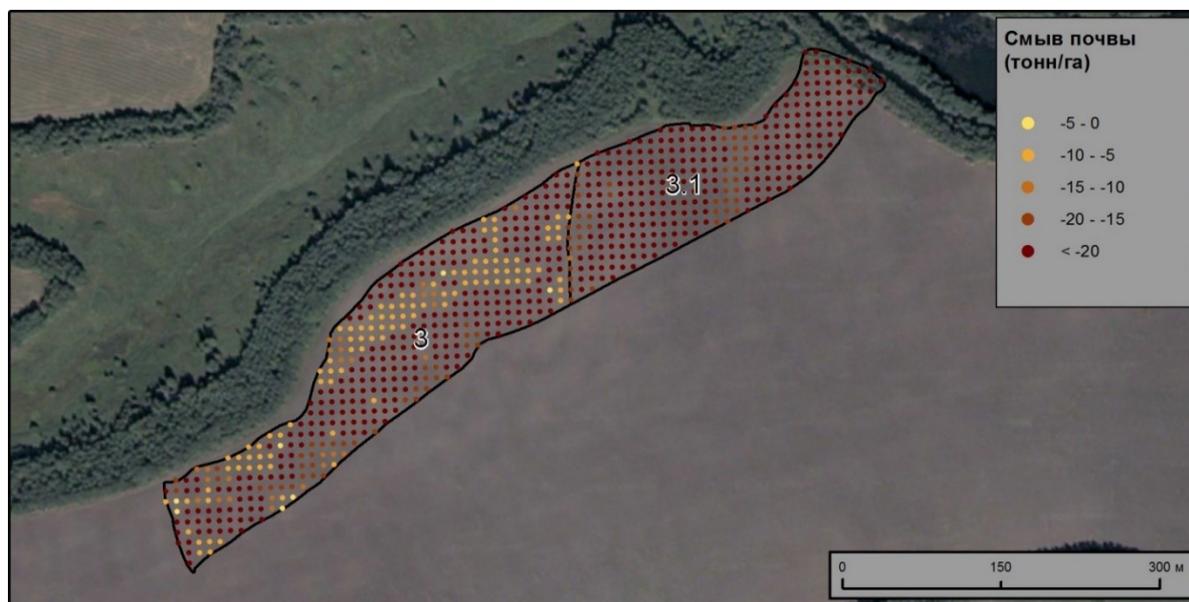


Рис. 13. Карта интенсивности смыва почвы на участке с сильновыпаханными почвами. Использовалась пропорциональная модель расчета темпов эрозионно-аккумулятивных процессов [Маркелов, 2004; Трофимец и др., 2023]

Fig. 13. A map of the soil runoff intensity in the area of highly degraded plowed soil. A proportional model was used to estimate the rates of erosion-accumulative processes [Markelov, 2004; Trofimetz et al., 2023]

Ввиду того, что структура полевого участка не позволила найти за пределами поля понижение, в которое «впадала» бы анализируемая ложбина, авторы не смогли заложить несколько разрезов для корректной оценки объема аккумуляции в днище этого понижения [Голосов и др., 2022]. Авторы апробировали способ расчета, в основу которого были положены результаты послойного по глубине отбора проб почвы в точке 26923.2 (9), а также измерения на спутниковом снимке сверхвысокого пространственного разрешения и на карте площади сбора. Для расчета интенсивности доставки почвы по ложбине в точку 26923.2 (9) использовали точечные значения площади сбора выше и ниже точки пробоотбора 26923.2 (9) (рис. 12). В табл. 3 приведены три варианта расчета интенсивности доставки смытой почвы в точку послойного отбора. Зона отложения наносов (или, по Н. Н. Бобровицкой [1996], «конусы выноса») определялась по темному цвету участка на спутниковом снимке.

В первом варианте площадь намытого слоя почвы (площадь тела аккумуляции) рассчитывалась по разности площади сбора в точке, расположенной ниже точки послойного по глубине пробоотбора за вычетом площадей двух «притоков» ложбины (их площади 3 783 и 2 538, рис. 12, справа). Площадь тела аккумуляции, умноженная на мощность намытого слоя почвы (0,34 м) — это объем намытой (аккумулятивной) почвы за период 37 лет (с 1986 по 2023 г.). Площадь водосбора ложбины, с которой смывалась почва — 0,64 га. Плотность почвы — 1 110 кг/м<sup>3</sup>. Произведение объема намытой почвы на плотность почвы — объем намытой почвы в тоннах. Смыв почвы с одного гектара — частное от деления объема в тоннах на площадь ложбины в гектарах. В результате расчета по первому варианту интенсивность выноса почвы по ложбине составила 6,5 т/га/год.

Табл. 3. Интенсивность доставки почвы, смытой с водосбора ложбины площадью 6 382 м<sup>2</sup>, в точку 26923.2 (9) за период с 1986 по 2023 г. Плотность почвы 1 110 кг/м<sup>3</sup>. Число лет — 37

Table 3. The intensity of the runoff soil delivery from the watershed of ravine with a catchment area of 6 382 m<sup>2</sup> to the 26923.2 (9) plot in 1986–2023. Soil density is 1 110 kg/m<sup>3</sup>; 37 years

Точка	Площадь сбора, м <sup>2</sup>		Площадь тела аккумуляции	Слой намытой почвы, м	Объем намытой почвы, м <sup>3</sup>	Тонн с 1 га/год
26923.2(9) Вариант1	6382	6728	6728 – 3783 – 2538 = 407	0,34	138,4	6,5
26923.2(9) Вариант2	6382	6728	21,2 × 14 = 296,8		100,9	4,7
26923.2(9) Вариант3	6382	6728	6728 – 6382 = 346		130,6	5,5

Второй вариант расчета потребовал измерения ширины понижения в устьевой части ложбины на спутниковом снимке (на рис. 12 это L = 21,2 м). Такова ширина тела аккумуляции почвы, смытой с водосбора ложбины. Понижение на спутниковом снимке распознавалось по темному цвету соответствующего участка снимка. Длина участка с намытой почвой составила 14 м (размер диагонали пикселя карты площади сбора). В результате расчета площадь тела аккумуляции составила 296,8 м<sup>2</sup>. Объем тела аккумуляции — 100,9 м<sup>3</sup>. Интенсивность доставки почвы с 1 га площади водосбора ложбины — 4,7 т/га/год. Разница расчета по двум вариантам — 27,7 %.

Третий вариант расчета — самый простой. В этом варианте допускается, что площадь намытого слоя почвы (площадь тела аккумуляции) рассчитывается по разности площадей сбора в точках, расположенных выше и ниже точки пробоотбора. В этом случае, при допущении что площадь тела аккумуляции равна разности площадей 6 728 и 6 382

(346 м<sup>2</sup>), интенсивность доставки смытой почвы в точку составила 5,5 т/га/год. Разница с расчетом по второму варианту в этом случае составит 0,8 т/га/год или 14,5 %.

Можно резюмировать, что для предварительной оценки объема доставки смытой почвы за пределы водосбора ложбины можно использовать предложенные схемы расчета, в которых используются космические снимки, карты площади сбора и результаты послонного отбора проб почвы в устьевой части ложбины. Это хоть и неточный, но менее трудоемкий прием расчета объема тела аккумуляции по сравнению с отбором проб почвы послонно по глубине на разном расстоянии от устья ложбины.

На карте интенсивности смыва (рис. 13) величина интенсивности смыва почвы в точке 26923.2 (9) — более 20 т/га/год. Однако с водосбора ложбины выносятся 4,7–6,5 т/га/год (табл. 3). Остальная почва переоткладывается в понижениях в пределах водосборной поверхности ложбины.

## ВЫВОДЫ

Количественная оценка потерь почвы вследствие водной эрозии на участках сельскохозяйственных полей с почвами, в разной степени выпаханности, должна осуществляться дифференцированно, в зависимости от степени выпаханности почв и особенностей рельефа (в частности, в зависимости от расчлененности поверхности и от ее уклонов). Радиоцезиевый метод в сочетании с полевыми методами, дистанционными методами, ГИС-анализом и статистическим анализом позволяет количественно оценивать интенсивность потерь почвы в каждой точке сельскохозяйственного поля, почвы которого отличаются разной степенью выпаханности. Полуэмпирический метод расчета эрозионных потерь серой лесной почвы на участках сельскохозяйственных полей, характеризующихся сильной выпаханностью (более 15 баллов по шкале Ганжары и Борисова), предложенный в статье, следует рассматривать в качестве требующего дополнительного изучения и апробации. Предложенный способ расчета выноса почвы за пределы поля по данным послонного отбора проб почвы по глубине на устьевом участке ложбины и по карте площади сбора авторы статьи считают предметом дальнейшего обсуждения (дискуссии).

Не вызывает сомнений факт, что изучение потерь почвы вследствие водной эрозии на сильновыпаханных почвах и разработка метода расчета потерь с использованием радиоцезиевого метода требует крупномасштабных исследований.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке РФФ, грант № 23-27-00298<sup>1</sup>. Спутниковые снимки предоставлены DigitalGlobe Foundation.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The study was carried out with the support of the RSF, grant № 23-27-00298<sup>2</sup>. 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.

Атлас Орловской области. М.: ФСГиК России, 2000. 49 с.

Беннет Х. Х. Основы охраны почв. М.: Издательство иностранной литературы, 1958. 411 с.

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

<sup>2</sup> Russian Science Foundation. Web resource: <https://rscf.ru/project/23-27-00298/> (accessed 04.04.2024)

- Бобровицкая Н. Н.* Водная эрозия на склонах и сток речных наносов. Диссертация в виде научного доклада доктора географических наук. СПб, 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 им. К. А. Тимирязева, 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.
- Гумматов Н. Г., Жиромский С. В., Мироненко Е. В., Пачепский Я. А., Щербаков Р. А.* Гео-статистический анализ пространственной изменчивости водоудерживающей способности серой лесной почвы. Почвоведение, 1992. № 6. С. 52–62.
- Долгополова Н. Н.* Физическая и агрохимическая характеристика почв в условиях Центрально-Черноземного государственного заповедника. Труды ЦЧГЗ, 1948. Вып. 2. С. 14–19.
- Карпачевский Л. О.* Зеркало ландшафта. М.: Мысль. 1983. 156 с.
- Кирюшин В. И.* Экологические основы земледелия. М.: Колос, 1996. 367 с.
- Кирюшин В. И.* Экологизация земледелия и технологическая политика. М.: Издательство МСХА, 2000. 473 с.
- Кирюшин В. И.* Агрономическое почвоведение. СПб.: Квадро, 2013. 678 с.
- Мамонтов В. Г., Родионова Л. П., Быковский Ф. Ф., Сирадж А.* Лабильное органическое вещество почвы: номенклатурная схема, методы изучения и агроэкологические функции. Известия ТСХА, 2000. Вып. 4. С. 93–108.
- 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.
- Таразанова Т. В.* Диагностика степени выпаханности почв зонального ряда Европейской части России. Диссертация кандидата биологических наук. М.: Издательство МСХА им. К. А. Тимирязева, 2002. 148 с.
- 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. Геоинформационная поддержка устойчивого развития регионов в условиях кризиса: 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.
- Шарый П. А.* Оценка взаимосвязей рельеф-почва-растения с использованием новых методов в геоморфометрии. Автореферат диссертации кандидата биологических наук. Тольятти: Институт экологии Волжского бассейна РАН, 2005. 23 с.

*Batista P. V. G., Davies J., Silva M. L. N., Quinton J. N.* On the evaluation of soil erosion models: Are we doing enough? *Earth-Science Reviews*, 2019. V. 197. P. 102898. DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.102898.

*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.

*Tsymbarovich P., Kust G., Kumani M., Golosov V., Andreeva O.* Soil erosion: An important indicator for the assessment of land degradation neutrality in Russia. *International Soil and Water Conservation Research*, 2020. V. 8. Iss. 4. P. 418–429. DOI: 10.1016/j.iswcr.2020.06.002.

*Walling D. E., He Q.* Improved models for estimating soil erosion rates from cesium-137 measurements. *Journal of Environmental Quality*, 1999. V. 28. Iss. 2. P. 611–622.

*Zhidkin A., Fomicheva D., Ivanova N., Dostal T., Yurova A., Komissarov M., Krasa J.* A detailed reconstruction of changes in the factors and parameters of soil erosion over the past 250 years in the forest zone of European Russia (Moscow Region). *International Soil and Water Conservation Research*, 2022. V. 10. Iss. 1. P. 149–160. DOI: 10.1016/j.iswcr.2021.06.003.

*Zhidkin A., Gennadiev A., Fomicheva D., Shamshurina E., Golosov V.* Soil erosion models verification in a small catchment for different time windows with changing cropland boundary. *Geoderma*, 2023. V. 430. P. 116322. DOI: 10.1016/j.geoderma.2022.116322.

## REFERENCES

*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).

Atlas of the Oryol Region. Moscow: Russian FSG&C, 2000. 49 p. (in Russian)

*Batista P. V. G., Davies J., Silva M. L. N., Quinton J. N.* On the evaluation of soil erosion models: Are we doing enough? *Earth-Science Reviews*, 2019. V. 197. P. 102898. DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.102898.

*Bennett H. H.* Fundamentals of soil protection. Moscow: Foreign Literature Publishing House, 1958. 411 p. (in Russian).

*Bobrovitskaya N. N.* Water erosion on slopes and runoff of river sediments. Doctoral dissertation in geographic sciences. St. Petersburg, 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 in biological sciences. Moscow, Publishing House of the Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 2008. 43 p. (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.

*Dolgopolova N. N.* Physical and agrochemical characteristics of soils in the conditions of the Central Chernozem State Reserve. *Proceedings of the CCSR*, 1948. Iss. 2. P. 14–19 (in Russian).

*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.

*Gummatov N. G., Jeromsky S. V., Mironenko E. V., Pachepsky Ya. A., Shcherbakov R. A.* Geostatistical analysis of spatial variability of the water-retaining capacity of gray forest soil. *Eurasian Soil Science*, 1992. No. 6. P. 52–62 (in Russian).

*Karpachevsky L. O.* The mirror of the landscape. Moscow: Mysl', 1983. 156 p. (in Russian).

*Kiryushin V. I.* Ecological foundations of agriculture. Moscow: Kolos, 1996. 367 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).

*Kiryushin V. I.* Agronomic soil science. St. Petersburg: Quadro LLC, 2013. 678 p. (in Russian).

*Mamontov V. G., Rodionova L. P., Bykovsky F. F., Siraj A.* Labile organic matter of soil: nomenclature scheme, methods of study and agroecological functions. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy (TAA)*, 2000. Iss. 4. P. 93–108 (in Russian).

*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 the dissertation for the scientific degree of PhD in Geography. Moscow: Moscow University Press, 2004. 22 p. (in Russian).

*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 the dissertation for the scientific degree of PhD in Biology. Moscow: Moscow University Press, 2009. 24 p. (in Russian).

*Shary P. A.* Assessment of the relief-soil-plants interlinkages using new methods of geomorphometry. Author's abstract of the dissertation for the scientific degree of PhD in Biology. Tolyatti: Institute of Ecology of the Volga Basin of Russian Academy of Sciences, 2005. 23 p. (in Russian).

*Tarazonova T. V.* Diagnostics of the degree of tillage of soils in the zonal range of the European part of Russia. Dissertation for the scientific degree of PhD in Biology. Publishing House of the Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 2002. 148 p. (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.

*Tsymbarovich P., Kust G., Kumani M., Golosov V., Andreeva O.* Soil erosion: An important indicator for the assessment of land degradation neutrality in Russia. *International Soil and Water Conservation Research*, 2020. V. 8. Iss. 4. P. 418–429. DOI: 10.1016/j.iswcr.2020.06.002.

*Walling D. E., He Q.* Improved models for estimating soil erosion rates from cesium-137 measurements. *Journal of Environmental Quality*, 1999. V. 28. Iss. 2. P. 611–622.

*Zhidkin A., Fomicheva D., Ivanova N., Dostal T., Yurova A., Komissarov M., Krasa J.* A detailed reconstruction of changes in the factors and parameters of soil erosion over the past 250 years in the forest zone of European Russia (Moscow Region). *International Soil and Water Conservation Research*, 2022. V. 10. Iss. 1. P. 149–160. DOI: 10.1016/j.iswcr.2021.06.003.

*Zhidkin A., Gennadiev A., Fomicheva D., Shamshurina E., Golosov V.* Soil erosion models verification in a small catchment for different time windows with changing cropland boundary. *Geoderma*, 2023. V. 430. P. 116322. DOI: 10.1016/j.geoderma.2022.116322.