

Л. Н. Трофимец¹, Е. А. Паниди², Н. Н. Чаадаева³, А. П. Тяпкина⁴, А. М. Сараева⁵,
А. А. Лаврусевич⁶, Н. А. Туманов⁷, А. В. Тарасов⁸, А. О. Баркалов⁹

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ПОТЕРЬ ПОЧВЫ В СВАЛЬНО-РАЗВАЛЬНЫХ БОРОЗДАХ И ВРЕМЕННЫХ РУЧЬЯХ: БАССЕЙН ВЕРХНЕЙ ОКИ

АННОТАЦИЯ

В работе приводятся результаты исследований, проводившихся в 2015–2023 гг. на экспериментальном полигоне в бассейне верхней Оки (в Орловском р-не Орловской обл.). Изучались потери почвы вследствие водной эрозии в ручье, сформировавшемся после весенних ливневых осадков, и в тальвегах свально-развальных борозд на участке сельскохозяйственного поля с сильно-, слабо- и средневспаханнтыми серыми лесными почвами. Цель исследования заключалась в выработке предложений по введению повышающих коэффициентов к смыву почвы, рассчитанному по разработанным авторским уравнениям, основу алгоритма которых составили активность цезия-137, площадь сбора и профильная кривизна рельефа. Приводятся уравнения для расчета активности цезия-137 (как маркера смытости почв) для участков с почвами разной степени выпашанности. Установлено, что повышающие коэффициенты должны применяться к участкам тальвегов ручьев и свально-развальных борозд, обнаруженных на спутниковых снимках или при визуальном обследовании. Результаты сравнения потерь почвы в ручье и в тальвегах свально-развальных борозд показали, что потери почвы в ручье на участке с сильновыпаханными почвами превышают потери почвы в свально-развальных бороздах в 1,7–2,0 р. Повышающий коэффициент для расчета смыва почвы в тальвегах свально-развальных борозд, равный 1,7, предлагается применять к рассчитанному смыву по уравнению на участках с сильновыпаханными почвами и уклонами 1°–2°. Повышающий коэффициент для ручьев на этих участках выше — достигает 2,0 и более. Повышающий коэффициент для ручьев к рассчитанному смыву для участка со слабовыпаханными почвами, но с уклонами 4–6°, составляет 1,3–1,4. Актуальность исследования определяется необходимостью оценки потерь почвы вследствие водной эрозии для адаптивного управления землепользованием. Сделан вывод, что влияние степени выпашанности почв на развитие водной эрозии требует дополнительных исследований.

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

³ 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

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

⁵ 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

⁶ Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, ул. Миклухо-Маклая, д. 23, Москва, Россия, 117997, *e-mail*: lavrusevich@yandex.ru

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

⁸ Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева, Медицинский институт, кафедра внутренних болезней, ул. Комсомольская, д. 95, Орел, Россия, 302026, *e-mail*: arcorel@yandex.ru

⁹ Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева, Институт естественных наук и биотехнологии, ул. Комсомольская, д. 95, Орел, Россия, 302026, *e-mail*: 7oup@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: выпаханные почвы, легкоразлагаемое органическое вещество, радиоцезиевый метод, алгоритм расчета, интенсивность смыва почвы, ГИС

Lyubov N. Trofimetz¹, Evgeny A. Panidi², Natalia N. Chaadaeva³, Angela P. Tyapkina⁴, Anna M. Saraeva⁵, Andrey A. Lavrusevich⁶, Nikita A. Tumanov⁷, Arkady V. Tarasov⁸, Aleksandr O. Barkalov⁹

QUANTITATIVE ASSESSMENT OF SOIL LOSS IN PLOWING FURROWS AND SPRING RAINFALL STREAMS: THE UPPER OKA BASIN

ABSTRACT

The paper presents some results of a study conducted in 2015–2023 in an experimental area located in the Upper Oka Basin (Oryol District of the Oryol Region, Russia). Soil losses were studied, which were observed due to water erosion in a stream formed after spring heavy rains and in thalwegs of plowing furrows in an agricultural field with heavily, lightly and medium overplowed gray forest soils. The purpose of the study was to elaborate proposals for the increasing coefficients application to soil runoff estimations produced according to the equations developed by authors. The computational algorithm of the equations is based upon the accounting of in-soil caesium-137 radioactivity, the catchment area and the profile curvature of the topography relief. The equations were elaborated for caesium-137 radioactivity estimation (used as a marker of soil runoff) at plots with soils of varying washout (degradation) degrees. It has been established that increasing coefficients have to be applied to sectors of streams and plowing furrows found on satellite images or during visual inspection. The comparison results of soil loss observed in the stream and in the plowing furrows showed that soil loss in the stream in a sector of heavily overplowed soils exceeds soil loss in the plowing furrows by 1.7–2.0 times. It is proposed to apply the 1.7 increasing coefficient to soil runoff estimations in thalwegs of plowing furrows in areas with heavily overplowed soils with 1°–2° slope. The increasing coefficient for streams in these areas is higher — it reaches 2.0 or more. The increasing coefficient for streams in an area of lightly overplowed soils with 4°–6° slope, is 1.3–1.4. The study relevance is determined by the need to assess a soil loss observed due to water erosion, when ensuring adaptive land use management. It is concluded that the influence of the soil overplowing degree onto the water erosion development requires additional research.

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

² St. 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, Institute of Natural Sciences and Biotechnology, 95, Komsomolskaya str., Orel, 302026, Russia, *e-mail*: n.chaadaeva@list.ru

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

⁵ Orel State University, Institute of Natural Sciences and Biotechnology, 95, Komsomolskaya str., Orel, 302026, Russia, *e-mail*: amsaraeva-osu@yandex.ru

⁶ Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Exploration University, 23, Miklukho-Maklaya str., Moscow, 117997, Russia, *e-mail*: lavrusevich@yandex.ru

⁷ Orel State University, Institute of Natural Sciences and Biotechnology, 95, Komsomolskaya str., Orel, 302026, Russia, *e-mail*: trofimetc_1_n@mail.ru

⁸ Orel State University, Medical Institute, Department of Internal Diseases, 95, Komsomolskaya str., Orel, 302026, Russia, *e-mail*: arcorel@yandex.ru

⁹ Orel State University, Institute of Natural Sciences and Biotechnology, 95, Komsomolskaya str., Orel, 302026, Russia, *e-mail*: 7oup@mail.ru

KEYWORDS: plowed soils, easily decomposable organic matter, radiocaesium method, computational equations, soil runoff intensity, GIS

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдающиеся в последние годы чередования оттепельных периодов и периодов замерзания зимой, приводящие к снижению интенсивности водной эрозии в весенний период, а также участвовавшая повторяемость засушливых периодов в летне-осенний сезон заставляют с особым вниманием относиться к исследованию потерь почвы в периоды экстремальных природных событий. Для распахиваемых склонов Центральной России к таковым могут быть отнесены ливневые осадки, сопровождающиеся формированием ручейковой сети на склоновых поверхностях весной и летом-осенью. В условиях обнаруженной тенденции к аридизации климата в летнее-осенний период последних лет большой интерес представляет также изучение особенностей формирования запасов гумуса на участках с выпаханной почвой. В связи с этим минимум задач, встающих сегодня перед исследователями, сводится к следующим. Первая — изучить и дать количественную оценку потерь почвы в ручейковой сети, формирующейся в период ливневых осадков весеннего периода, и разработать алгоритм учета этих потерь в моделях расчета смыва почвы. Вторая — дать количественную оценку потерь почвы в свально-развальных бороздах (как путях транзита почвенного вещества). Третья — исследовать особенности формирования запасов гумуса на участках полей с выпаханной почвой. Четвертая — сравнить потери почвы в элементах эрозионной сети естественного и антропогенного происхождения на участках почв разной степени выпаханности. Выпаханная почва, как известно, формируется при недостаточном поступлении в пахотный горизонт лабильного органического вещества (пожнивных остатков, органических удобрений). По утверждению Б. А. Борисова [2008], неразложившиеся органические остатки также участвуют и в накоплении радионуклидов, что важно учитывать при производстве сельскохозяйственной продукции на землях, загрязненных радионуклидами чернобыльского происхождения.

Поля Орловской области (входящей в зону загрязнения чернобыльскими радионуклидами) могут выступать модельными участками для изучения современного состояния выпаханной почвы. При этом цезий-137 чернобыльского происхождения может выступать маркером степени эрозионного преобразования сельскохозяйственных полей.

В связи со всем вышесказанным становится очевидной актуальность исследований, направленных на изучение особенностей протекания водной эрозии на почвах, выпаханной в разной степени. Особенно важно количественно учитывать величину водной эрозии на тех участках полей, поверхность которых нарушена ручьями, сформировавшимися в период весеннего таяния снега под действием ливневых дождей, выпавших на оттаявшую сверху почву. Интерес также представляет изучение роли свально-развальных борозд в формировании потерь почвы.

Цель настоящего исследования — по материалам экспериментальных данных показать возможности радиоцезиевого метода и морфометрических показателей рельефа количественно оценить потери почвы в ручьях, сформированных ливневыми осадками весеннего периода на серых лесных почвах разной степени выпаханности, а также оценить смыв почвы в свально-развальных бороздах. Приоритет отдавался той части исследования, которая посвящалась оценке смыва почвы в ручьях. Объект исследования — экспериментальный участок сельскохозяйственного поля в бассейне р. Сухой Орлицы Орловского р-на Орловской обл.

В качестве первоочередных задач были поставлены следующие:

1. Проанализировать метеорологические условия формирования ручьев на участках экспериментального поля для установления роли ливневых осадков весеннего периода в формировании водной эрозии на поле с вспаханной почвой.
2. Изучить особенности послойного распределения цезия-137 по глубине в тальвеге ручья, обнаруженного в мае 2015 г. на экспериментальном поле, а также в тальвегах свально-развальных борозд для установления величины точечных потерь почвы на этих объектах.
3. Провести сравнительный анализ потерь почвы в тальвегах свально-развальных борозд и в тальвеге ручья.
4. Исследовать особенности латерального распределения потерь почвы по длине тальвега ручья для выяснения роли участков аккумуляции в снижении потерь почвы вследствие водной эрозии.
5. Используя метод сравнения смыва почвы, рассчитанного по разработанным авторским эмпирическим уравнениям для участков очень слабо-вспаханной, средне-вспаханной и сильно-вспаханной почв, со смывом почвы, рассчитанным по результатам послойного по глубине отбора проб почвы в точках, расположенных в тальвегах, разработать систему поправочных коэффициентов. Вводить поправочные коэффициенты необходимо для тех участков, на которых весенний спутниковый снимок сверх-высокого разрешения позволяет обнаружить свально-развальные борозды и ручьи.

Как известно, вспаханная почва отличается малым содержанием в пахотном горизонте растительных остатков. Главной причиной в настоящее время считается внесение недостаточного количества органических удобрений [Таразанова, 2002; Борисов, 2008]. Анализ динамики внесения минеральных удобрений на поля Орловской обл. показал, что начиная с 1991 г. и практически по 2013 г. (четверть века) объем вносимых удобрений не достигал нормы (норма — 100 кг/га). Не следует исключать и возможное снижение поступления органических остатков в почву по причине наблюдающегося в последние годы потепления летне-осеннего сезона. Высокие температуры лета и осени могли спровоцировать снижение поступления органических остатков в пахотный горизонт. Это могло привести к уменьшению содержания в нем ЛОВ (легкоразлагаемого органического вещества). Нестеренко Ю. М. [2006] показал, что на аридных землях «под действием высоких температур ускоренно разлагается гумус верхних слоев почвы, о чем свидетельствует часто наблюдаемое в малогумусных почвах повышенное его содержание в горизонте *B* по сравнению с горизонтом *A*». В некоторых точках послойного отбора проб почвы по глубине на экспериментальном поле авторами статьи была обнаружена ситуация, похожая на описываемую Ю. М. Нестеренко (рис. 1). Пахотные земли Орловской обл., расположенные в лесостепной зоне России, могут считаться периодически страдающими от засух. Аридные территории в лесостепной зоне, по утверждению ряда авторов [Зонн и др., 2006] «охватывающие пять засушливых в разной степени природно-сельскохозяйственных зон», захватывают и лесостепную зону. В лесостепи доля аридных территорий достигает 8,1 %. По утверждению тех же авторов, «в Центральном районе представлены только периодически засушливые территории лесостепной зоны. Они занимают около 23 %. Вероятность сухих и засушливых лет в лесостепной зоне России составляет 10–20 %» и далее: «из общей площади сельскохозяйственных угодий Центрального района около 20 % эрозионноопасны, из них 19 % уже эродированы. Наиболее эродированной является пашня. Из общей площади пашни Центрального района 23 % площадей эрозионноопасны, из них 22 % площадей уже эродированы». Итак, налицо комплекс факторов, переводящих задачу количественной оценки потерь почвы в число актуальных для практики землепользования.

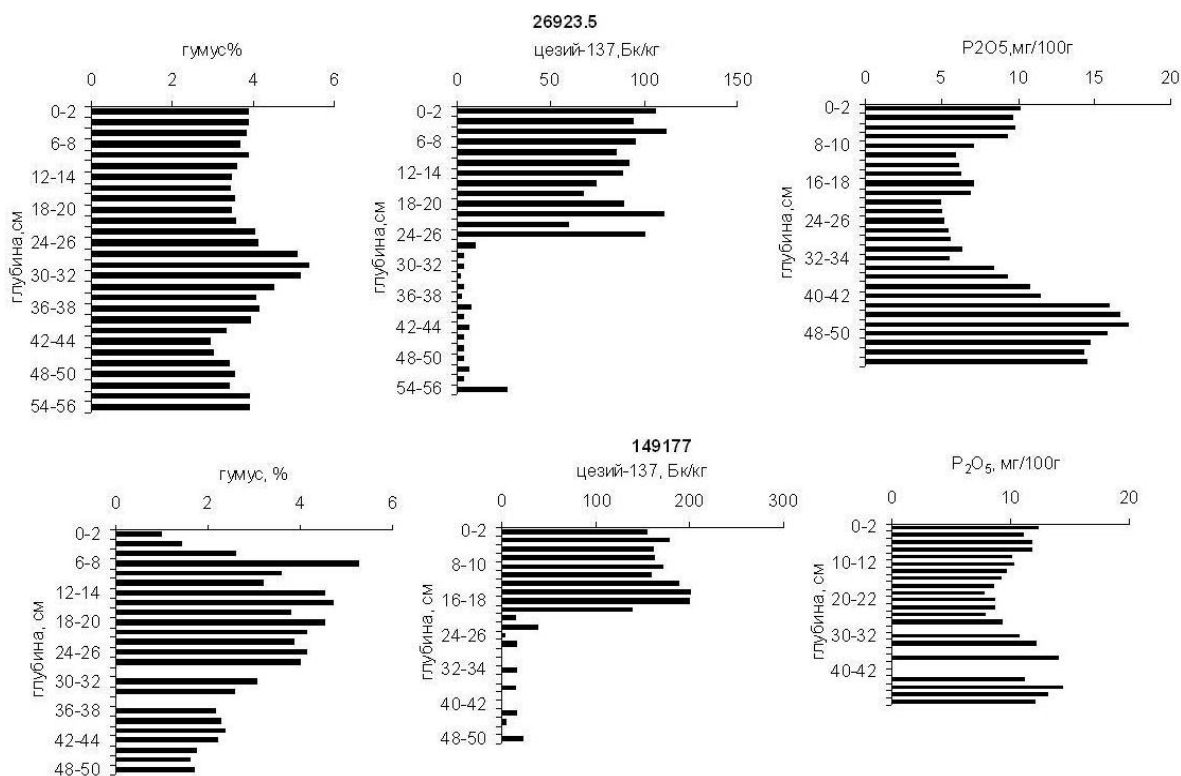


Рис. 1. Распределение по глубине цезия-137, гумуса и подвижного фосфора в точках 26923.5 и 149177

Fig. 1. In-depth distribution of caesium-137, humus, and mobile phosphorus at 26923.5 and 149177 sampling plots

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились на участке сельскохозяйственного поля с серыми лесными почвами, расположенного на склоне южной экспозиции в бассейне р. Сухая Орлица (Орловского р-на Орловской обл.). Загрязнение почв цезием-137 чернобыльского происхождения (максимальные измеренные значения активности цезия-137 в пахотном горизонте 0–25 см превысили 200 Бк/кг (рис. 2)) и пространственная вариабельность активности цезия-137 позволили авторам использовать его в качестве маркера потерь почвы вследствие водной эрозии. Измеренные вдоль катен значения активности цезия-137 в пахотном горизонте экспериментального участка ранее были положены в основу построения сеточной карты смыва почвы [Трофимец и др., 2024]. Ввиду того, что цель настоящего исследования состояла в уточнении величин потерь почвы в ручьях, формирующихся в последние годы как в ложбинах, так в свально-развальных бороздах и в колеях от автотранспорта в период формирования талого стока, к исследованию были привлечены данные полевых измерений, проведенных авторами в 2015 и 2017 гг. Измерения проводились в тальвеге сухого русла, обнаруженного на склоне южной экспозиции в конце апреля 2015 г. Послойные по глубине измерения в свально-развальных бороздах осуществлялись в 2017 г. Использовались результаты послойного отбора проб почвы по глубине с интервалом 2 см в точках, расположенных как в тальвеге ручья, так в тальвегах свально-развальных борозд. Измерения в свально-развальных бороздах проводились на участках, расположенных на водораздельной поверхности. Всего к анализу были привлечены результаты послойного по глубине отбора проб почвы в 7 точках: 5 расположены в сухом русле ручья, протекавшего весной по ложбине (точки 244150–244154 на рис. 3), и еще 2 в ручье, сформировавшемся в колеях от

автотранспорта (точки 244155 и 244257 на рис. 3). К анализу смыва почвы в тальвегах свально-развальных борозд были привлечены данные измерений в 6 точках, расположенных в свально-развальных бороздах (точки 49172, 49173, 149175, 149176 на рис. 3–4). Построение диаграмм послойного распределения по глубине активности цезия-137 позволило рассчитать среднее значение активности цезия-137 в пахотном горизонте 0–25 см. По формуле (1) активность цезия-137 была пересчитана в смыв почвы.

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

где R — смыв почвы, т/га·год,
 B — плотность почвы, 1 110 кг/м³,
 Z_p — слой интегрального отбора проб почвы в точке (0,25 м),
 $(t - t_0)$ — расчетный период, равный 30 г. (2016–1986 гг.),
 A — отношение измеренной активности цезия-137 в почве в точке отбора пробы к удельной активности цезия-137, принятой за опорное значение (174,7 Бк/кг),
 10 — коэффициент перехода к т/га.

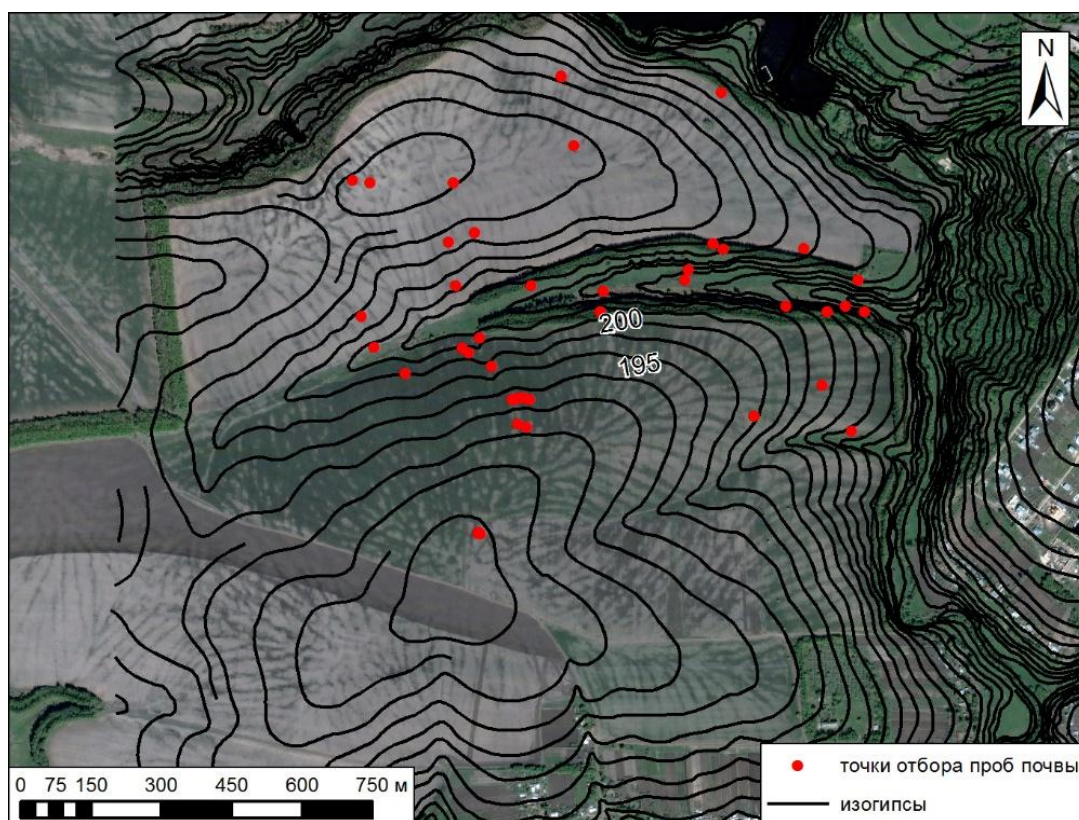


Рис. 2. Расположение точек отбора проб почвы на экспериментальном участке (координаты вершины склона южной экспозиции 53°0'20,9"; 35°56'51,9"). Показаны точки отбора интегральных проб почвы в слое 0–25 см; активность цезия-137 в отображенных точках достигает 200 Бк/кг или превышает это значение

Fig. 2. Location of the soil sampling plots in the experimental area (coordinates of the southern exposure slope: 53°0'20,9"; 35°56'51,9"). The integral (in a 0–25 cm layer) soil sampling plots are shown; the caesium-137 radioactivity at the shown plots reaches or exceeds 200 Bq/kg

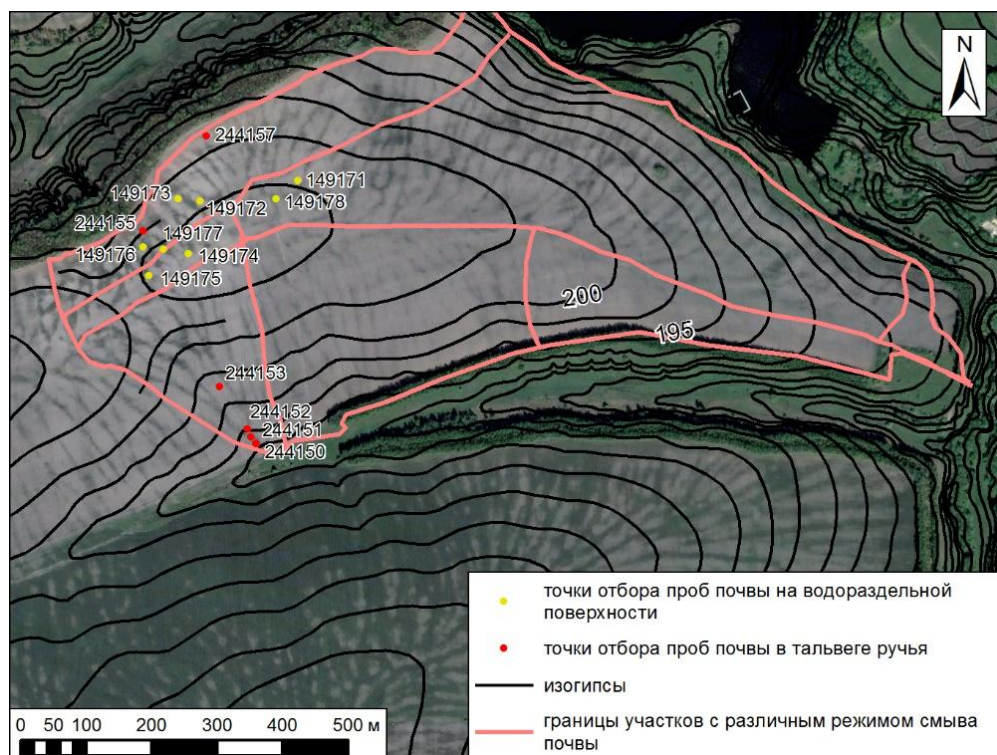


Рис. 3. Расположение точек отбора проб с учетом форм микрорельефа
Fig. 3. Location of sampling plots taking into account the microrelief landforms



Рис. 4. Расположение точек отбора проб с учетом форм микрорельефа
(с увеличением масштаба)
Fig. 4. Location of sampling plots taking into account the microrelief landforms
(zoomed in)

Сравнение рассчитанных с использованием диаграмм значений смыва почвы с теми значениями, которые для этих точек были рассчитаны по уравнениям, разработанным для характерных участков экспериментального поля (по этим уравнениям ранее была построена сеточная карта смыва почвы [Трофимец и др., 2024]), позволили рассчитать повышающие коэффициенты. Коэффициенты авторы рекомендуют вводить к значениям смыва почвы, полученным по уравнениям (положенным в основу построения сеточной карты), для тех участков, на которых спутниковые снимки сверхвысокого пространственного разрешения (разрешением выше 0,5 м на пиксель) обнаружили тальвеги ручьев или свально-развальные борозды. Возможно, такую информацию в будущем авторы смогут получить по снимкам с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), которыми в настоящее время не располагают.

Метод, использующий цезий-137 в качестве маркера потерь почвы вследствие водной эрозии, который использовался в работе, а также почвенно-морфологический метод оценки смыва почвы в точке сегодня являются широко распространенными при изучении смыва почвы на распахиваемых склонах [Голосов и др., 2024; Трофимец и др., 2024; Фомичева и др., 2024]. Используемые в нашей стране в последние годы модели расчета потерь почвы, такие как RUSLE, WaTEM/SEDEM [Голосов и др., 2024; Кузнецова и др., 2024; Фомичева и др., 2024], используют в расчетных схемах региональные параметры и постоянные степенные показатели, применяемые к удельной площади водосбора и локальному значению уклона. Например, фактор эрозионной активности осадков вычисляется через среднегодовое количество осадков. Топографический фактор — через удельную площадь водосбора, локальные значения уклонов, постоянные значения показателей площади и уклона [Кузнецова и др., 2024]. В этих моделях не используются «в чистом виде» такие морфометрические показатели, как площадь сбора и профильная кривизна. По мнению Шарого П. А. [2005], добавление в эти модели площади сбора значительно улучшает картину эрозионного узора поверхности.

В настоящем исследовании в расчетах использовался морфометрический показатель «площадь сбора» «в чистом виде». Также использовались измеренные в полевых условиях значения активности цезия-137 в пахотном слое. Измеренные в точках вдоль катен точечные значения активности цезия-137 (маркера потерь почвы вследствие водной эрозии), которым в соответствие ставились точечные значения площади сбора (рассчитано по методу DEMON [Costa-Cabral, Burges, 1994]) и знака профильной кривизны (рассчитано по методу Эванса [Evans, 1972]), позволили получить алгоритмы расчета смыва почвы, свободные от возможных погрешностей, возникающих при включении в расчетные схемы нормализованных индексов (региональных параметров), точные значения которых трудно поддаются оценке. Предложенный авторами метод расчета потерь почвы в ручьях и свально-развальных бороздах можно оценивать как полуэмпирический.

Модель рельефа, использовавшаяся в работе, была разработана с использованием модуля 3D Analyst. Она была представлена в виде регулярной сетки отметок (ячеек), DEM (Digital Elevation Model), с шагом 10 м на основе данных топографической съемки (топографической карты, созданной в соответствии с существующими требованиями) м-ба 1:10 000. Площадь сбора рассчитывалась в ГИС SAGA. Алгоритм, по которому рассчитывалась площадь сбора — DEMON (Digital Elevation Model Networks) [Шарый, 2005; Costa-Cabral, Burges, 1994]. С его помощью рассчитывалось направление тока в каждой ячейке DEM. При этом приток через каждую клетку — это поток, подошедший к этой клетке плюс поток, порожденный самой клеткой. Площади сбора для ячеек вычисляются последовательным суммированием площадей ячеек, представляющих все потоки через данный пиксель с введением коэффициента, учитывающего ширину потока. Фактически этот подход реализует потоковое структурирование процесса перемещения почвенного вещества. Потоковое структурирование поверхности используется при описании многих процессов на склоно-

вых поверхностях. В частности, весьма успешно, но в иной модификации оно используется при описании движения почвенного вещества в горных районах [Сабитова, 2022].

Профильная кривизна рассчитывалась по формуле Эванса [1972]. Для дифференцирования склоновой поверхности на расчетные участки использовались спутниковые снимки сверхвысокого разрешения от 05.05.2003, 19.05.2012, 07.07.2014. Использованы данные аппаратов WorldView-1–2, представленные как панхроматические снимки и снимки, синтезированные в натуральных цветах, соответственно. Пространственное разрешение снимков (0,5 м/пикс) позволило выполнять визуальное дешифрирование временных водотоков и структур микрорельефа на распаханых участках склона в пределах экспериментального участка. Последние опознавались путем анализа участков пашни с более влажной и более сухой почвой. Увлажненные участки (полосы) хорошо видны на пахотном поле, отображенном на рис. 5. Использование ЦМР, построенной для изучаемого участка, карт рельефа в м-бе 1:10 000, карт площади сбора, крутизны, профильной кривизны, позволило авторам [Трофимец и др., 2024] дифференцировать анализируемый участок сельскохозяйственного поля на несколько расчетных участков. В настоящей статье обсуждаются три участка (рис. 5): участок № 3, охарактеризованный как участок с сильновыпаханными почвами, участок № 1 (со слабовыпаханными почвами), участок № 4.2 (с очень слабовыпаханными почвами) и участок № 4.1 (со средневыхаханнми почвами). Выпаханность почв оценивалась по методу Ганжары-Борисова [Таразанова, 2002; Борисов, 2008]. Выпаханность оценивалась для интегральных проб почвы. Интегральная проба почвы, состоявшаяся из 10 точек пробоотбора, расположенных на разных высотных позициях склоновой поверхности в пределах 4 участков площадью от 1 до 19 га (рис. 5), позволила дать осредненную оценку степени выпашанности почв для этих участков.

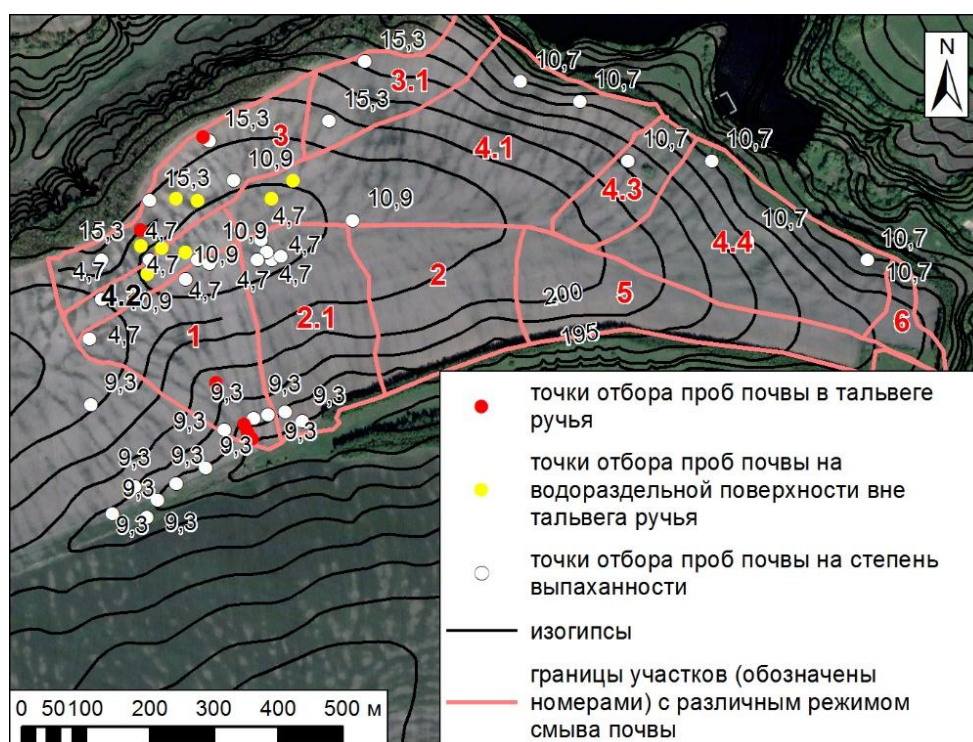


Рис. 5. Точки послойного пробоотбора. Числами обозначены: степень выпашанности почвы (черные цифры), границы выделенных в пределах экспериментального поля расчетных участков (красные цифры)

Fig. 5. The layer-by-layer soil sampling plots. Numbers reflect: the overplowing level (black digits), the numbers of the zones with different soil runoff intensity regime (red digits)

Определение содержания гумуса в почве проводилось по методу Тюрина, оценка активности цезия-137 — гамма-спектрометрическим анализом. Анализ почвы на выпашанность проводился в Тимирязевской академии.

В настоящей статье приводятся уравнения, разработанные авторами с использованием измеренных значений активности цезия-137 в слое 0–25 см (предиктант) и таких морфометрических показателей, как площадь сбора (предиктор) и профильная кривизна (предиктор), рассчитанных по картам площади сбора и профильной кривизны, построенных в м-бе 1:10 000. Сравнение смыва почвы, рассчитанного с использованием диаграммы распределения по глубине активности цезия-137, с величиной смыва почвы, рассчитанного по авторским уравнениям [Трофимец и др., 2024], позволили авторам получить количественные значения величин, характеризующих превышение смыва почвы в тальвегах сухих русел над значениями, полученными расчетным путем. Расчеты проводились для 4 участков сельскохозяйственного поля, отличающихся степенью выпашанности почв.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках задачи оценки возможного влияния повторяемости засушливых лет в последнее десятилетие на процесс формирования выпашанных почв был проведен анализ обеспеченности (в многолетнем ряду из 75 лет) максимальных температур за декады июня–августа. Анализ показал (табл. 1), что последние годы (2000–2020) можно отнести по максимальным за декаду температурам в августе к годам редкой обеспеченности (не более 23 % в многолетнем ряду из 75 лет).

Табл. 1. Обеспеченность (1–23 %) значений максимальных декадных температур периода 2000–2020 гг. в общем ряду температур за 1946–2020 гг.

Table 1. The probability (1–23 %) of the of the maximum decadal temperature values of 2000–2020 in the general temperature range in 1946–2020

	Декада 1	Декада 2	Декада 3
июнь			
Обеспеченность 1–23 %	2001, 2004, 2005, 2008, 2016, 2021	2003, 2004, 2014, 2017, 2018	2003, 2007, 2014
июль			
Обеспеченность 1–23 %	2002, 2010, 2012, 2015, 2020, 2021	2001, 2006, 2007, 2009, 2010, 2012, 2014, 2016, 2021	2001, 2002, 2010, 2011, 2014, 2015, 2018, 2020, 2021
август			
Обеспеченность 1–23 %	2002, 2005, 2006, 2007, 2010, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016	2001, 2007, 2008, 2011, 2013, 2014, 2015, 2017, 2018, 2019	2000, 2004, 2007, 2008, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020

Из табл. 1 видно, что за 75-летний период (с 1946 г. по 2020 г.) в число лет с обеспеченностью максимальных декадных температур в августе, июле и июне в пределах 1–23 % (т. е. встречающихся крайне редко — от 1 раза в 100 лет до 23 раз в столетие) вошли 6–10 лет периода 2001–2020 гг. Видно, что практически половина двадцатилетнего периода начала века характеризовалась экстремально высокими максимальными температурами в 1, 2 и в 3 декадах каждого из трех анализируемых месяцев. По данным Доклада о климатических рисках¹ в 2010, 2012, 2013 гг. (острозасушливых годах) потери урожайности яровой пшеницы в Центральном федеральном округе (ЦФО) составили 50,5 %, 19,9 % и

¹ Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации. Санкт-Петербург, 2017. 106 с.

35,1 %, соответственно (относительно урожая 2008 г.). Анализ средних месячных температур в августе за период с 1886 г. по 2024 г. (124 года) показал, что 2004, 2007, 2010, 2014, 2016, 2017, 2018, 2021, 2022, 2023, 2024 гг. по среднемесячным температурам в августе вошли в число обеспеченных от 1 % до 23 %, т. е. засухливость августа в 2000-х гг. была очень редкой повторяемости (от 1 года до 23 лет в столетие).

На следующем этапе (этапе изучения возможных причин возникновения выпавших почв) авторы проверили справедливость утверждения Ю. Н. Нестеренко о том, что *«под действием высоких температур ускоренно разлагается гумус верхних слоев почвы, о чем свидетельствует часто наблюдаемое в малогумусных почвах повышенное его содержание в горизонте В, по сравнению с горизонтом А»* [Нестеренко, 2006]. Анализ диаграмм послойного по глубине распределения гумуса в точках пробоботбора на водораздельной поверхности показал, что на изучаемом поле не наблюдается ситуации, когда бы максимальные значения гумуса отмечались не в пахотном слое, а глубже, в слое В. Были обнаружены лишь две точки с похожей картиной распределения гумуса по глубине. Первая — точка 26923.5 на рис. 1, где, судя по очертаниям диаграммы, можно говорить о тенденции снижения содержания гумуса в пахотном горизонте и увеличении его содержания на глубине более 30 см. Вторая — точка 149177 (также рис. 1), расположена на водораздельной поверхности, на блочном повышении, в зоне очень слабо выпавших почв (с показателем выпаванности 4,7, рис. 5). На рис. 1 видно, что в этой точке почва загрязнена цезием на глубину до 20 см, т. е. можно считать, что почва в точке практически не смыта или очень слабо смыта. Увеличение цезия-137 на глубине 18–20 см до значений 196,2 Бк/кг свидетельствует о том, что на этой глубине расположена, видимо, плужная подошва. Для проверки этого утверждения авторы проанализировали карту, приведенную на рис. 2. На карте показано распределение активности цезия-137 (превышающей или равной 200 Бк/кг) в пахотном слое. В основу построения карты были положены авторские данные результатов гамма-спектрометрического анализа интегральных проб почвы, отобранных из пахотного слоя 0–25 см, и проб почвы, отобранных послойно по глубине через 2 см за период полевых измерений в 2010–2024 гг. Из карты можно сделать вывод, что слой почвы, активность которого по цезию-137 находится в пределах 200 Бк/кг (или превышает ее), сохранился с 1986 г. Такая активность может маркировать почву в слое плужной подошвы, не затронутом перепашкой.

Распределение гумуса в точке 149177 (рис. 1) таково, что можно предполагать, что его снижение в верхних 8 см связано с влиянием засухливости последних лет с высокими августовскими температурами (табл. 1). Засухливость в августе сопровождалась снижением активности биоты, перерабатывающей стерню и сорняки в гумус. Диаграмма распределения подвижного фосфора в точке 149177 свидетельствует о том, что в верхних слоях почвы (в слоях, обедненных гумусом) подвижного фосфора сравнительно много. Несмотря на то, что *«характер связи фосфора с компонентами органического вещества почв остается не вполне установленным»* [Рахимгалиева и др., 2018], и *«максимальная доля подвижного фосфора характерна для верхнего гумусово-аккумулятивного горизонта»*, можно утверждать, что в верхнем слое почвы (диаграммы на рис. 1) отсутствует прямая зависимость между содержанием гумуса и подвижного фосфора. Из диаграмм видно, что в верхних слоях почвы содержание гумуса снижено, а содержание подвижного фосфора повышено. Верхние слои почвы с повышенным содержанием подвижного фосфора свидетельствуют о том, что происходило перемещение (перераспределение) фосфора из нижних подпахотных слоев почв в верхние слои массой ежегодно отмирающих корней. Можно предположить, что на поле на отдельных участках наблюдается снижение поступления органики в верхние слои почвы в последние годы при том, что отмирающие корни перемещают подвижный фосфор в верхние слои [Плотников, 2019]. В связи с тем,

что точка 149177 отнесена нами к участку с несмытыми почвами, то для нее, возможно, справедливо утверждение С. Б. Сосоровой [2022] о том, что *«органические и органо-минеральные фракции пахотных горизонтов несмытых почв характеризуются низкой сорбционной способностью по отношению к фосфат-иону»*. Органические вещества почвы способствуют растворению фосфатов. Как утверждает автор [Сосорова, 2022], *«органическое вещество и фосфаты являются конкурентами в борьбе за сорбционные места»*. В результате проведенного анализа можно сделать заключение, что авторам не удалось достоверно установить влияние повышенной аридности последних лет на создание условий для формирования выпаханных почв. Этот вопрос (вопрос причины образования ареалов выпаханных почв) остается дискуссионным. Можно сделать лишь предварительный вывод о том, что засушливые условия в августе последних лет привели к резкому сокращению активности микроорганизмов, переводящих растительные остатки в легкоразлагаемое органическое вещество (ЛОВ). В результате снизилось количество ЛОВ в пахотном горизонте. Хорошие условия пахоты и боронования на участках поля, расположенных вблизи дороги с удобным подъездом, сопровождавшиеся глубокой пахотой (перемещавшей отмирающие корни в верхние слои почвы) и тщательным боронованием (разбивались почвенные комки, выносились ЛОВ в верхние слои почвы), при уменьшении активности микроорганизмов в засушливых условиях способствовали формированию выпаханных почв.

Разумнее предположить, что основную роль в формировании участков выпаханных почв со сниженным значением содержания гумуса и низким содержанием ЛОВ играет система землепользования последних 30–40 лет, не способствовавшая формированию больших запасов гумуса в пахотном горизонте. Мало вносилось органических удобрений, а пожнивные остатки тщательно убирались с полей.

Перед авторами встал вопрос, может ли цезий-137 служить маркером эрозионных потерь в ручьях, формирующихся на тех участках экспериментального поля, на которых были обнаружены выпаханные почвы. Анализ спутниковых снимков показал, что ручьи на этих участках формируются как в свально-развальных бороздах, так и в тальвегах ручьев, протекающих по ложбинам (рис. 6). Сложный процесс стекания по склоновой поверхности, испещренной понижениями естественного и антропогенного происхождения (колеи от сельхозтехники), зачастую формирует сложную конфигурацию русел ручьев. О сложной конфигурации русла ручья свидетельствуют точки пробоотбора в тальвеге обнаруженного сухого русла в 2015 г. Точки послойного пробоотбора в сухом русле (точки 245150–245157) на рис. 5–6 маркируют тальveg такого ручья, обнаруженного в мае 2015 г. на склоне южной экспозиции. На спутниковом снимке 2012 г. (рис. 6б) этот же ручей (протекавший в 2012 г. по тальвегу ложбины), хорошо различим. Анализ метеоусловий апреля–мая 2015 г. (рис. 7) позволил сделать вывод о том, что ручей формировался в условиях, когда в ходе весеннего снеготаяния наступил период потепления. Среднесуточные температуры превысили 4,1–5 °С. В этих условиях, по утверждению некоторых авторов [Окулик, 2006], наступает такое состояние почвы, когда из-за чередования периодов промерзания-оттаивания нарушается межагрегатное сцепление, и почва, оттаивающая с поверхности, становится очень податливой к эродирующему воздействию водных потоков. В том случае, если в этот период выпадают ливневые дожди, то они формируют ручьи. В похожей ситуации весной 2015 г. сформировался ручей, в тальвеге которого была отобрана почва по глубине в точках 254150–254157. Примечательно, что ручей пересек участки с почвами слабой (степень выпаханности 9,3 — точки 245150–245153) и сильной выпаханности (степень выпаханности 15,3 — точки 245155 и 245157). На рис. 5 выше показаны участки поля с почвами разной степени выпаханности.

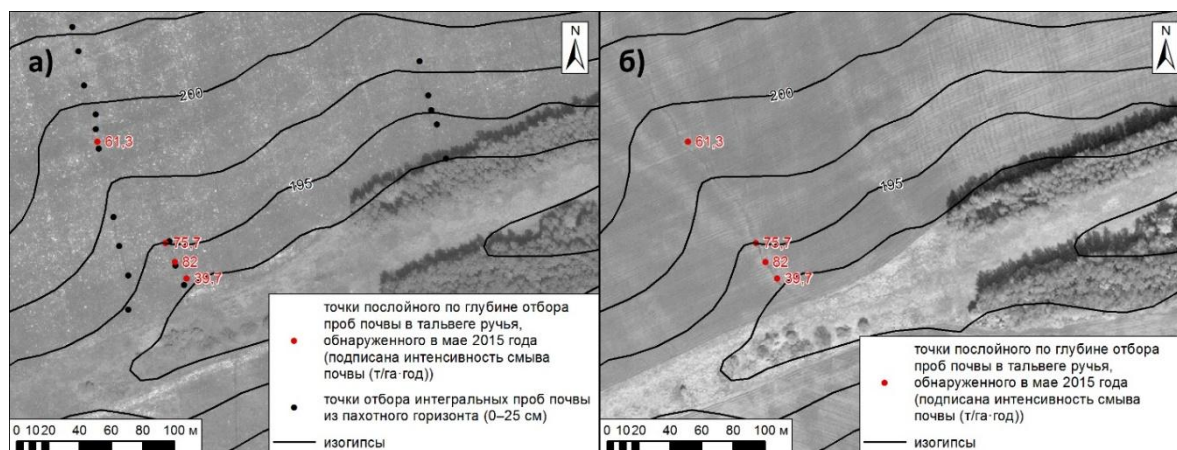


Рис. 6. а — точки отбора интегральных проб почвы из пахотного горизонта (0–25 см) приурочены к свально-развальным бороздам; спутниковый снимок 2014 г., на котором дешифрируются свально-развальные борозды; б — точки пробоотбора в тальвеге ручья на спутниковом снимке 2012 г.

Fig. 6. а — the sampling plots where the integral soil samples were collected in the 0–25 cm arable horizon are attached to the plowing furrows; a satellite image collected in 2014 that shows plowing furrows in arable field; б — the layer-by-layer soil sampling plots in the discovered in May 2015 stream thalweg, satellite image of 2014

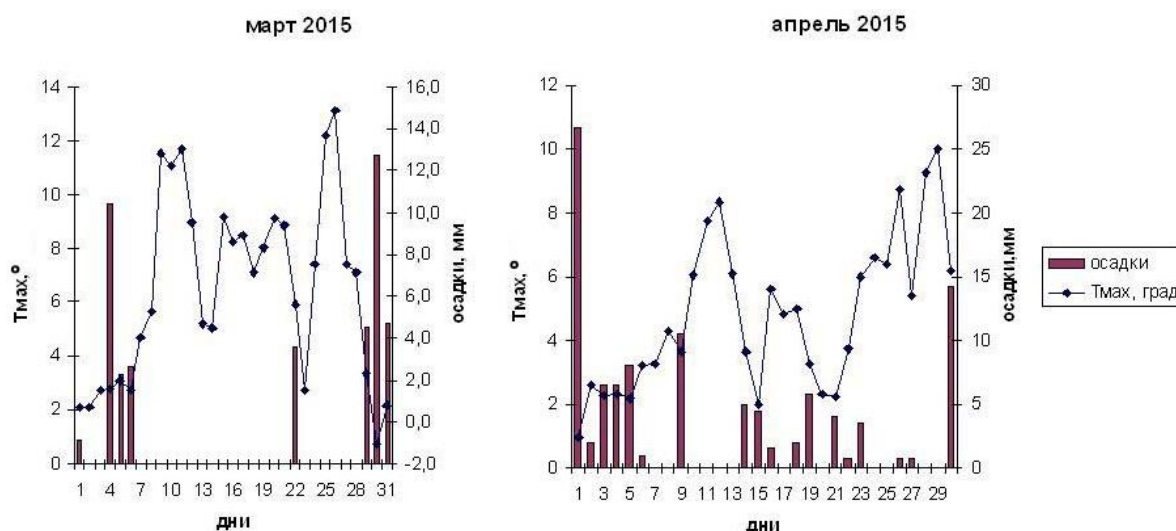


Рис. 7. Осадки и максимальные суточные температуры в марте–апреле 2015 г.
Fig. 7. Precipitation and maximum daily temperatures in March–April, 2015

На спутниковом снимке 2014 г. авторами были обнаружены свально-развальные борозды (рис. 4, ба). Их наложение на карту с почвами разной степени выпашанности (рис. 5) позволило сделать заключение, что точки послойного по глубине отбора проб почвы в тальвегах борозд приурочены к водораздельной поверхности. Они «падают» в тальвеги борозд, пересекающих участки с почвами очень слабовыпаханными. Например, точка 149175 «попала» в тальвег такой свально-развальной борозды, пересекающей почвы с показателем степени выпашанности 4,7. Точки 149174 и 149177 «попали» на блочные повышения, расположенные вне борозд (рис. 4). Точки, «попавшие» на участок со средневыпаханными почвами (степень выпашанности 10,3) — 149171 и 149178. На участок с

сильновыпаханными почвами (степень выпашанности 15,3) попали точки 149172, 149173, 149176. На рис. 3–4 показаны точки, расположенные в ручьях и в бороздах, в которых послойно отбиралась почва по глубине.

У авторов появилась возможность сравнения величин смыва почвы, полученного почвенно-морфологическим методом, в ручьях и в свально-развальных бороздах. Отбор проб почвы по глубине в точках, расположенных в тальвеге ручья, и наложение этих точек на карту степени выпашанности почв (рис. 5) позволили сделать вывод, что точками послойного отбора проб почвы в ручье «освещены» участки почв слабой (точки 254150, 254251, 254152, 254153) и сильной выпашанности (точки 254155, 254157) (табл. 2).

На следующем этапе авторы провели расчет величины смыва почвы, используя данные послойного по глубине распределения цезия-137 во всех анализируемых точках (табл. 2). Расчет интенсивности смыва почвы в точках послойного по глубине пробоотбора проводился по формуле (1).

Затем был проведен сравнительный анализ. Сравнивались значения величины смыва почвы в тальвеге ручья и в тальвегах свально-развальных борозд со смывом почвы, рассчитанным по разработанному эмпирическим уравнениям (рис. 8) [Трофимец и др., 2024].

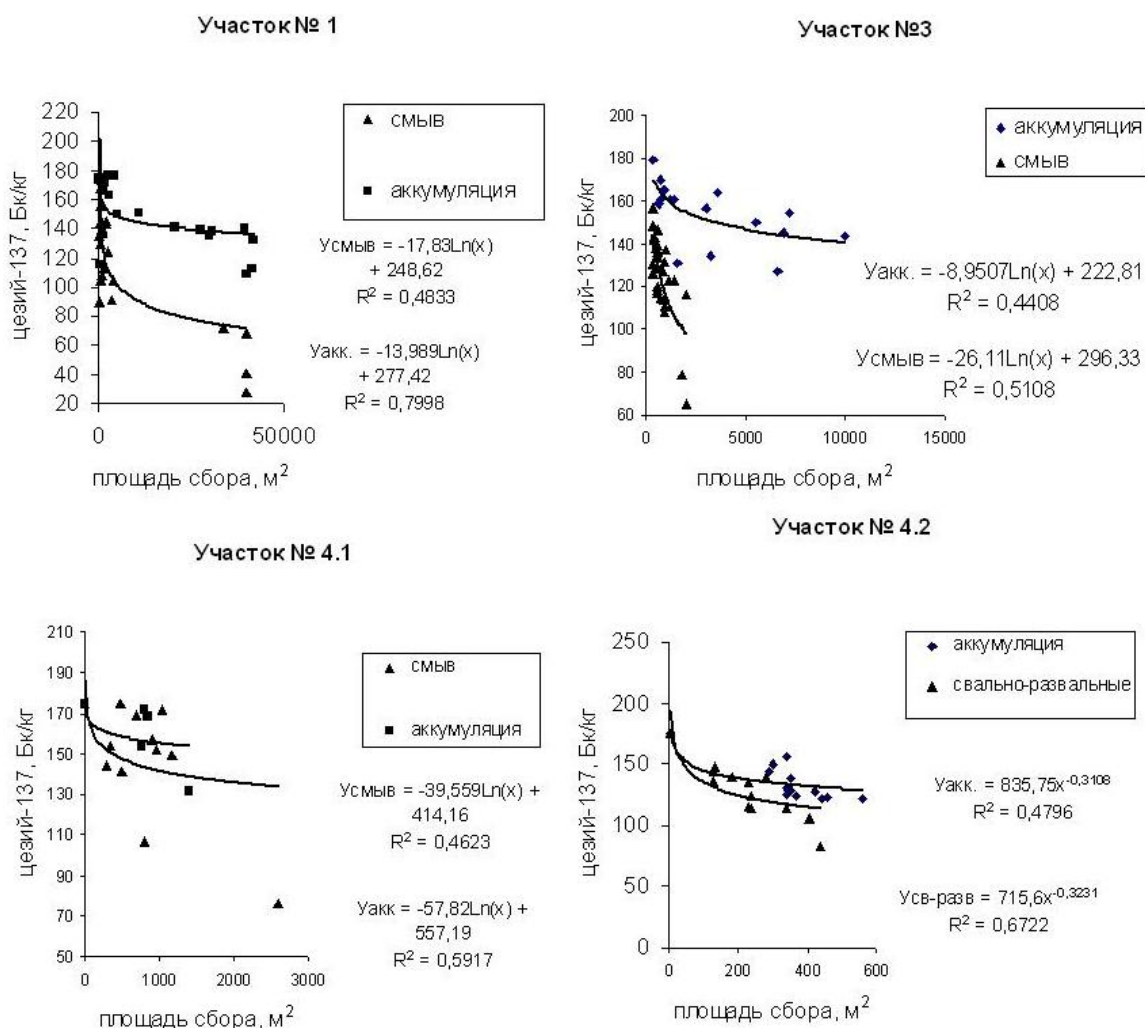


Рис. 8. Уравнения, разработанные для расчетных участков № 1, 3, 4.1, 4.2 (см. рис. 5)

Fig. 8. The equations developed for the zones No. 1, 3, 4.1, 4.2 (shown in Fig. 5)

Табл. 2. Потери почвы в точках послойного по глубине отбора проб почвы (активность цезия-137 на опорной площадке 174,7 Бк/кг)
 Table 2. Soil loss at the locations of layer-by-layer soil sampling plots (radioactivity of caesium-137 at the reference plot is 174.7 Bq/kg)

Точка	Расчетный район	Степень выпаханности	Цезий-137, Бк/кг, измер послойно	Смыв по формуле (1), измеренный	Знак профильной кривизны	Площадь сбора	Цезий по уравнению, разработан- ному для Расчетного участка, Бк/кг	Смыв по расчетному уравнению / повышающий коэффициент (6)/(10)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
В свально-развальных бороздах								
149172	3	15,3	97,6	39,5	+	593	129,6	23,1/1,7 (понижение)
149173	3	15,3	115,7	30,2	+	1 800 (1 100)	108,1	33,8/1
149175	4,2	4,7	151,3	12	–	300	142	17/1,0
149176	3	15,3	97,6	39,5	+	1 300	109,2	33,6/1,18
Вне свально-развальных борозд на блочном повышении водораздельной поверхности								
149178	4.1	10,7	153	11,1	+	280	180	0/1,0
149171	4.1	10,7	128	23,9	+	430	174	0/1,0
В тальвеге ручья								
244150	1	9,3		39,7	–	40 900	128,9	23,4/1,7
244151	1	9,3		82	+	39 000	60,1	58,7/1,4
244152	1	9,3		75,5	+	33 800	62,7	57,4/1,3
244153	1	9,3		61,3	+	22 600	69,7	53,8/1,1
244155	3	15,3		67,2	+	900	118	29/2,3
244157	3	15,3		62,4	+	1 800	100	38,3/1,6

На рис. 6 и 9 показаны значения интенсивности смыва почвы в анализируемых точках. Из рис. 9 видно, что точки пробоотбора, расположенные в тальвеге ручья, маркируют смыв почвы на участках с сильновыпаханными почвами (расчетный участок № 3, точки со смывом 62,4 и 67,2) и на участке со слабовыпаханными почвами (расчетный участок № 1, точки со смывом 39,7, 82, 75,7, 61,3). Точки пробоотбора, расположенные в тальвегах свально-развальных борозд на сильновыпаханных почвах (расчетный участок № 3) — это точки 149172, 149173, 149176 со смывом, равным 39,5, 30,2 и 39,5, соответственно (рис. 9). Участок с очень слабо выпаханнми почвами № 4.2 (степень выпаханности 4,7) оказался маркируем точками 149174 и 149177 (точки расположены вне свально-развальных борозд) (рис. 4). Интенсивность смыва в них равна 0. Точки 149171 и 149178 расположены на участке средневыпаханных почв (степень выпаханности 10,7) вне свально-развальных борозд.

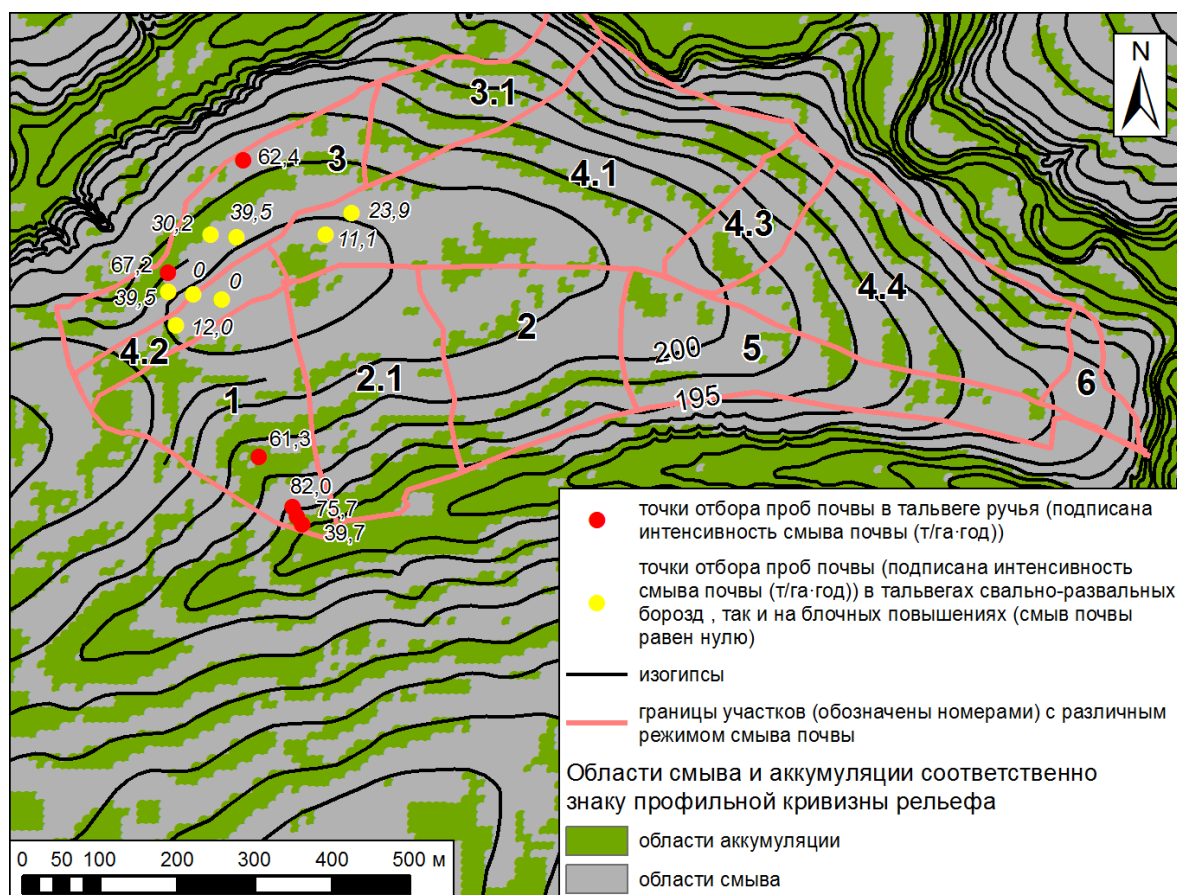


Рис. 9. Расположение точек отбора проб почвы относительно областей смыва и аккумуляции, выделенных с учетом знака профильной кривизны рельефа

Fig. 9. Location of the soil sampling plots according to the zones of flushing and accumulation, which were delineated basing on the sign of the profile curvature topographic variable

Пересчет в интенсивность смыва почвы (с 1986 по 2016 гг.) в т/га·год производился по формуле (1). Точки в тальвегах ручья показаны в табл. 2: 244150, 244151, 244152, 244153, 244155, 244156, 244257.

Рассмотрим, какие потери почвы вследствие смыва наблюдались в точках, расположенных в тальвегах свально-развальных борозд (табл. 2), в которых послойно по глубине осуществлялся отбор почвы. В связи с тем, что точки «попали» на разные высотные

позиции, они могут быть показательными и для выводов о влиянии рельефа на смыв почвы вследствие водной эрозии. Точка 149175 попала в тальвег свально-развальной борозды в зоне очень слабовыпаханных почв (участок 4.2, степень выпашанности 4,7), поэтому величина смыва почвы относительно невелика (12 т/га·год). Точки 149172, 149173, 149176 расположены в тальвегах свально-развальных борозд на участке с сильновыпаханными почвами (участок № 3 в табл. 2). Расчет показал, что смыв почвы в точке 149172 равен 39,5, в точке 149173 равен 30,2, в точке 149176 — 39,5 (графа 5 в табл. 2). Сравнение величин смыва почвы, рассчитанных по уравнению, разработанному для участка № 3 (рис. 8), с величиной смыва, рассчитанной в точке по формуле (1) при принятии в качестве опорного значения активности цезия-137 174,7 Бк/кг показало, что фактические потери почвы в точке превышают рассчитанные по уравнению (табл. 2, графа 9). Примечательно, что фактические потери почвы для тальвега ложбины превышают рассчитанные по уравнению в 1,7 р. (точка 149172). Превышение фактических потерь почвы в точках 149173 и 149176 (расположенных на водораздельной поверхности вне тальвегов ложбин на участке № 3) равны или меньше рассчитанных в 1 и 1,18 р. соответственно. Таким образом, можно сделать вывод, что при расчете по уравнению (рис. 8) для точек, «попавших» в тальвеги свально-развальных борозд, пересекающих межложбинные водоразделы, повышающий коэффициент, определенный по расчетному уравнению, находится в пределах 18–20 %. Для точек, «падающих» в места пересечения свально-развальными бороздами локальных понижений, повышающий коэффициент может возрасти до 70 % (точка 149172 в графе 9 табл. 2).

На участке со средневыпаханными почвами (расчетный участок 4.1, степень выпашанности 10,7) отмечено следующее. Прежде всего, точки 149171 и 149178 не «попали» в тальвеги свально-развальных борозд (рис. 4). Результаты сравнительных расчетов показали, что по уравнению, разработанному для участка 4.1, при площади сбора до 600 м², смыв почвы равен нулю (уравнение на рис. 8). Однако фактические потери почвы, рассчитанные по данным послойного отбора проб почвы по глубине (графа 6 табл. 2), составили 11,1 (точка 149178) и 23,9 (точка 149171) т/га·год. Предварительный вывод может быть следующим. Смыв почвы на участке со средневыпаханными почвами (выпаханность 10,7) при расположении точек на водораздельной поверхности (площадь сбора не более 600 м²) вне тальвегов свально-развальных борозд может рассчитываться по уравнению (рис. 8, участок № 4.1) с введением повышающих коэффициентов. Точка 149178, расположенная вне тальвега свально-развальной борозды (рис. 4), при площади сбора 280 м², попавшая на блочное повышение (т. е. расположенная вне зоны смыва), может считаться точкой, фиксирующей несмытую почву. Расчет по уравнению (рис. 8, участок № 4.1) показывает нулевой смыв (графа 10 табл. 2). Однако расчет по результатам послойного по глубине отбора проб почвы (графа 6 табл. 2) показал, что фактический смыв почвы в точке составляет 11,1 т/га·год, т. е. к данным, рассчитанным по уравнению, необходимо все же вводить повышающий коэффициент. Таким образом, даже в пределах блочных повышений на участке со средневыпаханными почвами экспериментально обнаружен смыв почвы. Он относительно невелик, но если учесть, что для изучаемой территории считается нормой смыв, оцениваемый в 5 т/га·год, то смыв в 11,1 т/га·год в два раза превышает норму. Следовательно, возможен вывод о том, что для участка средневыпаханных почв повышающие коэффициенты должны вводиться как для точек, расположенных на водораздельной поверхности в пределах блочных повышений, так и ко всем прочим точкам, расположенным в тальвегах свально-развальных борозд. Примечательна еще одна точка — 149175. Она попала в тальвег свально-развальной борозды на водораздельной поверхности на участке с очень слабовыпаханными почвами (участок № 4.2, площадь сбора, «замыкаемая» точкой — 300 м²). Фактический смыв почвы (по данным послойного по глубине отбора проб) составил 12 т/га·год. Смыв почвы, рассчитанный для этой точки по уравнению (рис. 8), составил

17 т/га·год (т. е. рассчитанный смыв превысил смыв, установленный по данным послойных измерений). Несмотря на то, что разница находится в пределах ошибки измерений, можно сделать вывод о необходимости уточнения алгоритма, разработанного для участка № 4.2 (рис. 8).

При рассмотрении различий, обнаруженных для участков почв с разной степенью выпашанности, обнаружено, что наименьшие значения смыва почвы в тальвегах свально-развальных борозд (12 т/га·год) отмечаются на водораздельной поверхности в области очень слабывыпашанных почв (точка 149175, расчетный участок № 4.2). Невысокие значения смыва почвы на средневывпашанных участках (точка 149178 со смывом 11,1 т/га·год на участке № 4.1), которые оказались близки к значениям смыва почвы на водораздельной поверхности, объясняются вероятнее всего положением точки отбора проб почвы по глубине в свально-развальной борозде, пересекающей блочное повышение в пределах приводораздельного пространства. В этом случае следует говорить или о необходимости более обоснованного выделения границ участков с почвами разной степени выпашанности, или о слабом влиянии выпашанности почв (степень выпашанности 10,7 достаточно велика) на ее потери вследствие водной эрозии.

Таким образом, в этой части исследования следует сделать следующее заключение. Вопрос о том, какие именно величины повышающих коэффициентов применять к интенсивности смыва почвы, рассчитанной по уравнениям [Трофимец и др., 2024] для участков тальвегов свально-развальных борозд, требует дополнительного изучения. Несомненно одно — вводить повышающие коэффициенты необходимо. Для этого следует проводить подробную съемку (с использованием цезия-137 в качестве маркера потерь почвы) для охвата как можно большего числа элементов эрозионной сети на склоновых поверхностях с почвами разной степени выпашанности.

Относительно смыва почвы в тальвеге ручья можно сказать следующее. Прежде всего следует отметить, что смыв и по уравнению, и по фактическим данным послойных измерений очень большой. Потери почвы по данным послойного отбора проб почвы изменяются от 39,7 т/га·год до 82 т/га·год. Повышающий коэффициент для рассчитанных величин потерь почвы по уравнению (рис. 8) для расчета потерь почвы, приближенным к реальным величинам потерь почвы в ручье на участке с сильновывпашанными почвами (участок № 3), достигает 2,3 (показательная точка 244155). Точка расположена на окраине поля в верховье ложбины (рис. 3). На межложбинном водоразделе (точка 244157) смыв меньше, но повышающий коэффициент для расчета смыва почвы в ручье, пересекающем межложбинный водораздел (причиной формирования ручья может быть колея от автотранспорта), для рассчитанных по уравнению величин также достаточно большой (1,6). Вывод может быть сделан следующий. Ручьи на сильновывпашанных почвах (со степенью выпашанности 15,3) осуществляют большую эрозионную работу, что следует учитывать. К достаточно большому смыву, рассчитанному по уравнению (29 т/га·год и 38,3 т/га·год, графа 6 в табл. 2) необходимо вводить повышающие смыв коэффициенты, равные 2,3 и 1,6 соответственно.

На участке со слабывпашанными почвами (участок № 1 со степенью выпашанности 9,3) по данным послойного по глубине отбора проб фактический смыв почвы изменяется от 39,7 до 82 т/га·год. Наименьший смыв (39,7 т/га·год) отмечен в зоне аккумуляции у основания склона (рис. 9). Повышающий коэффициент к данным, рассчитанным по уравнению на рис. 8, составляет 1,7 для этого участка (приуроченного к зоне аккумуляции) (графа 10 в табл. 2).

Точки у основания склона, смыв почвы в которых составил 82 т/га·год и 75,5 т/га·год, оказались на пересечении ручья, протекающего по тальвегу ложбины, и свально-развальной борозды (рис. 6). Повышающие коэффициенты к значениям, получен-

ным по уравнению на этом участке, равны 1,4 (точка 244151) и 1,3 (точка 244152). Выше по склону (точка 244153) смыв в точке составляет 61,3, повышающий коэффициент к данным, рассчитанным по уравнению, может не вводиться (он равен 1,1).

Вывод в данном случае состоит в том, что несмотря на то, что разработанные уравнения и построенная по ним карта смыва почвы [Трофимец и др., 2024] демонстрируют высокие значения потерь почвы, к точкам, расположенным в тальвегах свально-развальных борозд и в тальвегах ручьев (они могут быть обнаружены на спутниковых снимках сверхвысокого разрешения или на снимках, которые могут быть получены в результате съемки с БПЛА), должны вводиться повышающие коэффициенты.

На сильновыпаханных (степень выпаханности 15,3) и слабовыпаханных почвах (степень выпаханности 9,3) смыв в ручье одинаково высок. Максимальное значение смыва почвы отмечено на участке, где свально-развальная борозда пересекает тальвег ручья, протекающего по днищу ложбины (точка 244151 с величиной смыва 82 т/га·год и точка 244152 с величиной смыва 75,5 т/га·год). Повышающий коэффициент для точки 244151 — 1,4, для точки 244152 — 1,3. Расчет по разработанному уравнению интенсивности смыва почвы (и по карте интенсивности смыва почвы, приведенной в работе [Трофимец и др., 2024]) приводит к занижению фактического смыва почвы на 40 %.

На сильновыпаханных почвах (участок № 3) смыв в тальвегах ручьев превышает смыв в свально-развальных бороздах в 1,7–2 р.

ВЫВОДЫ

В статье впервые приведены результаты исследования пространственного распределения потерь почвы вследствие водной эрозии на участках поля с почвами разной степени выпаханности с привлечением цезия-137 в качестве маркера. В результате исследования был сделан следующий вывод. Для того, чтобы более точно оценивать потери почвы вследствие водной эрозии, необходимо изучать в эксперименте наиболее эрозионноопасные участки. Это могут быть ручьи, сформировавшиеся в колеях от автотранспорта, в свально-развальных бороздах, в тальвегах ложбин. Наиболее внимательно следует проводить измерения на участках совпадения свально-развальных борозд с ложбинами или в местах их пересечения. Послойный отбор проб почвы по глубине и использование в качестве маркера цезия-137 и снимков сверхвысокого разрешения или снимков с БПЛА позволят подробно (точечно) построить картину формирования эрозионных потерь почвы на сельскохозяйственных полях. Влияние степени выпаханности почв на развитие водной эрозии требует дополнительных исследований.

БЛАГОДАРНОСТИ

Спутниковые снимки предоставлены DigitalGlobe Foundation.

ACKNOWLEDGEMENTS

Satellite image courtesy of DigitalGlobe Foundation.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Борисов Б. А. Легкоразлагаемое органическое вещество целинных и пахотных почв зонального ряда европейской части России. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора биологических наук. М., 2008. 43 с.

Голосов В. Н., Шапиурина Е. Н., Колос Г. И., Петелько А. И., Жидкин А. П. Пространственно-временные изменения эрозионно-аккумулятивных процессов на малом водосборе в северной части Среднерусской возвышенности. Почвоведение, 2024. № 5. С. 738–755. DOI: 10.31857/S0032180X24050076.

Зонн И. С., Трофимов И. А., Шамсутдинов З. Ш., Шамсутдинов Н. З. Земельные ресурсы аридных территорий России. Аридные экосистемы, 2004. Т. 10. № 22-23. С. 87–101.

Кузнецова А. С., Краснощеков К. В., Дергунов А. В., Ерупова М. Г., Макаров Д. С., Харламов Д. В., Якубайлик О. Э. Моделирование водной эрозии с использованием уравнения RUSLE в масштабе землепользования. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2024. Т. 23. С. 145–154. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-145-154.

Марчик Т. П., Ефремов А. Л. Почвоведение с основами растениеводства. Гродно: ГрГУ, 2006. 249 с.

Нестеренко Ю. М. Водная компонента аридных зон: экологическое и хозяйственное значение. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. 286 с.

Окулик Е. В. Эрозия почв и миграция химических веществ с талым стоком (на примере серых лесных почв). Диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук. М., 2006. 139 с.

Плотников А. М. Содержание и запасы элементов питания в черноземах Зауралья. Вестник Курганской ГСХА, 2019. № 2. С. 19–22.

Рахимгалиева С. Ж., Есбулатова А. Ж., Сальников Э. А., Попов А. И. Содержание и запасы различных форм фосфора в темно-каштановых почвах. Наука и образование, 2018. № 4(53). С. 86–96.

Сабитова Н. И., Стельмах А. Г., Таджибаева Н. Р., Минченко В. Д. Применение ГИС-технологий и карт пластики рельефа для исследования оползней Чирчикского бассейна. ИнтерКарто. ИнтерГИС. М.: МГУ, Географический факультет, 2022. Т. 28. Ч. 1. С. 670–682. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-670-682.

Сосорова С. Б. Сорбция фосфора почвами западного Забайкалья. Агрохимия, 2022. № 3. С. 3–11.

Таразанова Т. В. Диагностика степени выпаханности почв зонального ряда Европейской части России. Диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук. М., 2002. 148 с.

Трофимец Л. Н., Паниди Е. А., Тарасов А. В., Баркалов А. О. Возможности дифференцированного подхода к оценке потерь почвы вследствие водной эрозии на сельскохозяйственных полях, загрязненных радиоцезием (бассейн верхней Оки). ИнтерКарто. ИнтерГИС. М.: МГУ, Географический факультет, 2024. Т. 30. Ч. 2. С. 263–281. DOI: 10.35595/2414-9179-2024-2-30-263-281.

Трофимец Л. Н., Чаадаева Н. Н., Тяпкина А. П., Сараева А. М., Тарасов А. В., Баркалов А. О., Петелько А. И., Бляхарский Д. П. Количественная оценка потерь почвы вследствие водной эрозии на сильновыпаханных почвах бассейна верхней Оки с использованием географических информационных систем. ИнтерКарто. ИнтерГИС. М.: МГУ, Географический факультет, 2024. Т. 30. Ч. 2. С. 192–213. DOI: 10.35595/2414-9179-2024-2-30-192-213.

Фомичева Д. В., Жидкин А. П., Комиссаров М. А. Полимасштабные оценки варьирования эродированности почв в условиях высокой неоднородности почвенного покрова северной лесостепи Среднерусской возвышенности. Почвоведение, 2024. № 2. С. 345–358. DOI: 10.31857/S0032180X24020116.

Шарый П. А. Оценка взаимосвязей рельеф-почва-растения с использованием новых методов в геоморфометрии. Автореферат диссертации кандидата биологических наук. Тольятти, 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.

REFERENCES

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 the dissertation for D.Sc. in biological sciences. Moscow, 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.

Evans L. S. General Geomorphometry, Derivatives of Altitude, and Descriptive Statistics. *Spatial Analysis in Geomorphology*. London: Methuen & Co. Ltd., 1972. P. 17–90.

Fomicheva D. V., Zhidkin A. P., Komissarov M. A. Multiscale Estimates of Soil Erodibility' Variation Under Conditions of High Soil Cover Heterogeneity in the Northern Forest-Steppe of the Central Russian Upland. *Eurasian Soil Science*, 2024. No. 2. P. 345–358 (in Russian). DOI: 10.31857/S0032180X24020116.

Golosov V. N., Shamshurina E. N., Kolos G. I., Petel'ko A. I., Zhidkin A. P. Spatio-Temporal Changes in Erosion-Accumulation Processes on a Small Watershed in the Northern Part of the Central Russian Upland. *Eurasian Soil Science*, 2024. No. 5. P. 738–755 (in Russian). DOI: 10.31857/S0032180X24050076.

Kuznetsova A. S., Krasnoshchekov K. V., Dergunov A. V., Erunova M. G., Makarov D. S., Kharlamov D. V., Yakubailik O. E. Modeling Water Erosion using the RUSLE Equation at the Land Use Scale. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, 2024. V. 23. P. 145–154 (in Russian). DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-145-154.

Marchik T. P., Efremov A. L. Soil Science with the Basics of Crop Production. Grodno: Grodno State University, 2006. 249 p. (in Russian).

Nesterenko Yu. M. The Water Component of Arid Zones: Ecological and Economic Importance. Yekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2006. 286 p. (in Russian).

Okulik E. V. Soil Erosion and Migration of Chemicals with Melt Runoff (On the Example of Gray Forest Soils). Dissertation for PhD in biological sciences. Moscow, 2006. 142 p. (in Russian).

Plotnikov A. M. The Content and Reserves of Batteries in the Chernozems of the Trans-Urals. *Bulletin of the Kurgan State Agricultural Academy*, 2019. No. 2. P. 19–22 (in Russian).

Rakhimgalieva S. Zh., Esbulatova A. Zh., Salnikov E. A., Popov A. I. The Content and Reserves of Various Forms of Phosphorus in Dark Chestnut Soils. *Science and Education*, 2018. No. 4(53). P. 86–96 (in Russian).

Sabitova N. I., Stelmakh A. G., Tajibaeva N. R., Minchenko V. D. Application of GIS Technologies and Plastic Flow Map for Studying Landslides of the Chirchik Basin. *InterCarto. InterGIS*. Moscow: Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 2022. V. 28. Part 1. P. 670–682 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-670-682.

Shary P. A. Assessment of the Relief-Soil-Plants Interlinkages using New Methods of Geomorphometry. Author's abstract of the dissertation for PhD in biological sciences. Tolyatti, 2005. 23 p. (in Russian).

Sosorova S. B. Phosphorus Sorption by Soils of Western Transbaikalia. *Agrochemistry*, 2022. No. 3. P. 3–11 (in Russian).

Tarazanova T. V. Diagnostics of the Degree of Tillage of Soils in the Zonal Range of the European part of Russia. Dissertation for PhD in biological sciences. Moscow, 2002. 148 p. (in Russian).

Trofimetz L. N., Chaadaeva N. N., Tyapkina A. P., Saraeva A. M., Tarasov A. V., Barkalov A. O., Petelko A. I., Bliakharskiy D. P. Quantitative Assessment of Water Erosion Soil Losses of Highly Degraded Plowed Soils in Upper Oka Basin using Geographic Information Systems. *InterCarto. InterGIS*. Moscow: Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 2024. V. 30. Part 2. P. 192–213 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2024-2-30-192-213.

Trofimetz L. N., Panidi E. A., Tarasov A. V., Barkalov A. O. Possibilities of a Differentiated Approach to Assessment of Water Erosion Soil Loss in Agricultural Fields Contaminated with Radiocaesium (Upper Oka Basin). *InterCarto. InterGIS*. Moscow: Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 2024. V. 30. Part 2. P. 263–281 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2024-2-30-263-281.

Zonn I. S., Trofimov I. A., Shamsutdinov Z. Sh., Shamsutdinov N. Z. Land Resources of Arid Territories of Russia. *Arid Ecosystems*, 2004. V. 10. No. 22-23. P. 87–101 (in Russian).