

УДК 631.459.2:631.92: 332.362

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭРОЗИОННО-АККУМУЛЯТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ НА МАЛОМ ВОДОСБОРЕ В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ СРЕДНЕРУССКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ

© 2024 г. В. Н. Голосов^{a, b}, Е. Н. Шамшурина^{a, b, *}, Г. И. Колос^b,
А. И. Петелько^c, А. П. Жидкин^b

^aМГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

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

^cНовосильская зональная агролесомелиоративная станция им. Козменко ВНИАЛМИ,
Семашко, 2А, Мценск, 303035 Россия

*e-mail: shamshyr@mail.ru

Поступила в редакцию 08.09.2023 г.

После доработки 11.11.2023 г.

Принята к публикации 15.11.2023 г.

Проведены комплексные исследования эрозии почв на водосборе площадью 42 га (близ с. Ломовец Орловской области) в зоне серых лесных почв, у которых противозерозионная устойчивость существенно ниже, чем у черноземов. Анализ архивных и исторических картографических материалов показал, что продолжительность распашки водосбора составляет 200 ± 10 лет. На основе использования полевых методов: почвенно-морфологического, радиоцезиевого, метода измерения водоин, детальной съемки с помощью БПЛА – и расчетов по эрозионной модели WaTEM/SEDEM определены темпы смыва и аккумуляции почв за весь период распашки без учета/с учетом самовосстановления почв: за последние 50 ± 25 лет, за постчернобыльский период с 1986 по 2022 гг., за единичное эрозионное событие, произошедшее 31 мая 2022 г., а также оценено пространственное распределение участков смыва/намыва почв. Полученные оценки свидетельствуют о флуктуациях темпов эрозионно-аккумулятивных процессов за прошедшие 200 лет, которые обусловлены преимущественно условиями формирования талого стока, повторяемостью и распределением внутри теплого времени года стокоформирующих ливней, набором высеваемых сельскохозяйственных культур, периодичностью и способами обработки почвы, изменением границ полей. Среднеголетние оценки эрозии почв за агрикультурный период выше аналогичных за постчернобыльский период, так как в последние 30 лет темпы эрозии почв снизились. Оценки потерь почвы с использованием модели WaTEM/SEDEM в целом сопоставимы с результатами определения потерь почв на основе почвенно-морфологического метода при условии учета перераспределения наносов до нижних границ пашни. Пространственная структура единичного эрозионного события оказалась в значительной степени близка пространственной структуре расположения ареалов смытых и намывных почв, сформировавшихся за весь агрикультурный период.

Ключевые слова: серые лесные почвы, Luvic Greyzemic Phaeozems, водная эрозия, перераспределение наносов, WaTEM/SEDEM, почвенно-морфологический метод, радиоцезиевый метод, БПЛА съемка
DOI: 10.31857/S0032180X24050076, **EDN:** YLGHVT

ВВЕДЕНИЕ

Изменения климата, особенно заметные в последние 30 лет, оказывают существенное влияние на развитие процессов водной эрозии в различных регионах мира [44, 51, 60]. Большая часть земельных ресурсов, используемых в сельском хозяйстве,

располагается в умеренном климатическом поясе, в пределах которого изменения климата имеют однородный тренд. Он обусловлен постепенным повышением зимних температур воздуха и увеличением повторяемости выпадения экстремальных ливневых осадков в теплое время года [38, 40].

В пределах Центральной и Восточной Европы, включая Восточно-Европейскую равнину, потепление климата в значительной мере сказывается на условиях формирования склонового стока и смыва в период весеннего снеготаяния и повторяемости эрозионных событий, связанных с выпадением стокоформирующих ливней высокой интенсивности [4, 49, 56, 58].

Определенная цикличность климатических характеристик наблюдалась в последние 200 лет. В пределах Восточно-Европейской равнины данная цикличность выражалась в чередовании относительно влажных и засушливых периодов [27]. Вероятно, это сказывалось на варьировании эрозионного индекса дождевых осадков. Температурный фон холодного времени года обеспечивал регулярное формирование талого стока в период весеннего снеготаяния, что подтверждается в основном высокими уровнями половодного стока на реках, дренирующих центр Европейской территории России (ЕТР) [2].

Кроме того, существенное влияние на эрозию почв в ЕТР оказало сокращение площади пахотных земель после 1991 г., особенно заметное в лесной зоне [24]. В меньшей мере сокращение площади пашни сказалось на снижении площади пахотных земель в пределах лесостепной зоны, что обусловлено высокой продуктивностью черноземов [48]. До 1991 г. площади пашни в центре ЕТР слабо изменялись с последней четверти XIX в. [14]. Детальная оценка наносов, переотложившихся в днищах сухих долин, расположенных в различных частях ЕТР, выявила общий тренд снижения потерь почвы от эрозии, произошедший в последние 30–35 лет по сравнению с предшествующим 25-летним периодом [46]. Фактическое сокращение темпов эрозии почв могло быть и меньше, учитывая, что продукты ливневого смыва в значительном объеме откладываются в нижних частях склонов, как по нижнему краю пашни, так и сразу за ее границей [37]. Оценки изменений потерь почвы, полученные на основе почвенно-морфологического метода в масштабах крупных обрабатываемых водосборов черноземной зоны ЕТР за весь период земледельческого освоения, указывают, что своего максимума они достигали во второй половине XX в. [45]. В этот период дополнительными факторами усиления водной эрозии стали укрупнение полей и изменение физических свойств почв (плотности сложения и водопроницаемости) в результате массового использования тяжелой сельскохозяйственной техники.

Особенности изменения эрозионно-аккумулятивных процессов на пахотных землях с преобладанием серых лесных почв не были в достаточной степени исследованы на основе использования набора полевых методов, в отличие от черноземной зоны. Между тем, противоэрозионная устойчивость

серых лесных почв существенно ниже, чем черноземов [21]. Широкое распространение серых лесных почв в сочетании с черноземами на границе лесостепной и лесной зон ЕТР определяет их достаточно высокую распаханность. В Орловской области эрозионные процессы протекают быстрыми темпами длительный период. Уже в 1939–1940 гг. в Новосильском районе по данным Новосильской зональной агролесомелиоративной опытной станции (ЗАГЛОС) из обследованных 38,5 тыс. га пашни смытых земель было 9%, а в Мценском районе – 7%. В целом в Орловской области в конце 1930-х гг. было эродировано 800 тыс. га пашни, из которых на сильно смытые почвы приходилось 5–6% площади. К концу 50-х гг. XX в. доля эродированных земель в целом по области составляла 2,5%, а в настоящее время – более 20% от площади пахотных земель. В настоящее время общая площадь эрозионно-опасных и подверженных эрозии почв в Орловской области составляет 1153,1 тыс. га, из них слабосмытых 301,2 тыс. га, среднесмытых 104,0 тыс. га и сильно смытых 19,3 тыс. га. Большая часть земель сельскохозяйственного назначения расположена на склоновых землях, в том числе 35,1% на склонах до 1°, 31,4% – на склонах до 2°, 26,4% – до 5°, 3,6% – до 7°, 2,8% – до 10 и 0,7% – свыше 10°, что способствует усиленному развитию водной эрозии почв. [13]. Таким образом, большие площади пашни, занятые серыми лесными почвами на склонах междуречий, являются потенциально эрозионно-опасными территориями, которые требуют повышенного внимания и изучения, в том числе в вопросах оценок флуктуаций эрозионно-аккумулятивных процессов в связи с изменениями агроэкологических условий.

Цель работы – детальная оценка трендов изменений темпов эрозионно-аккумулятивных процессов за различные интервалы времени на основе использования полевых методов и эрозионного моделирования на типичном малом водосборе с преобладанием в почвенном покрове серых и светло-серых лесных почв.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Основные физико-географические характеристики объекта. В качестве объекта исследования был выбран малый водосбор, расположенный близ с. Ломовец и являющийся основной частью водосбора крупного оврага, прорезающего левобережный борт р. Оки (рис. 1). Эта территория находится на северо-востоке Орловского района Орловской области в пределах северной половины Среднерусской возвышенности и занимает пограничное положение между лесостепной и лесной зонами.

Площадь исследуемой части водосбора составляет 42 га, из которых 97% занимает пашня, а 1,01 га приходится на залуженное и частично

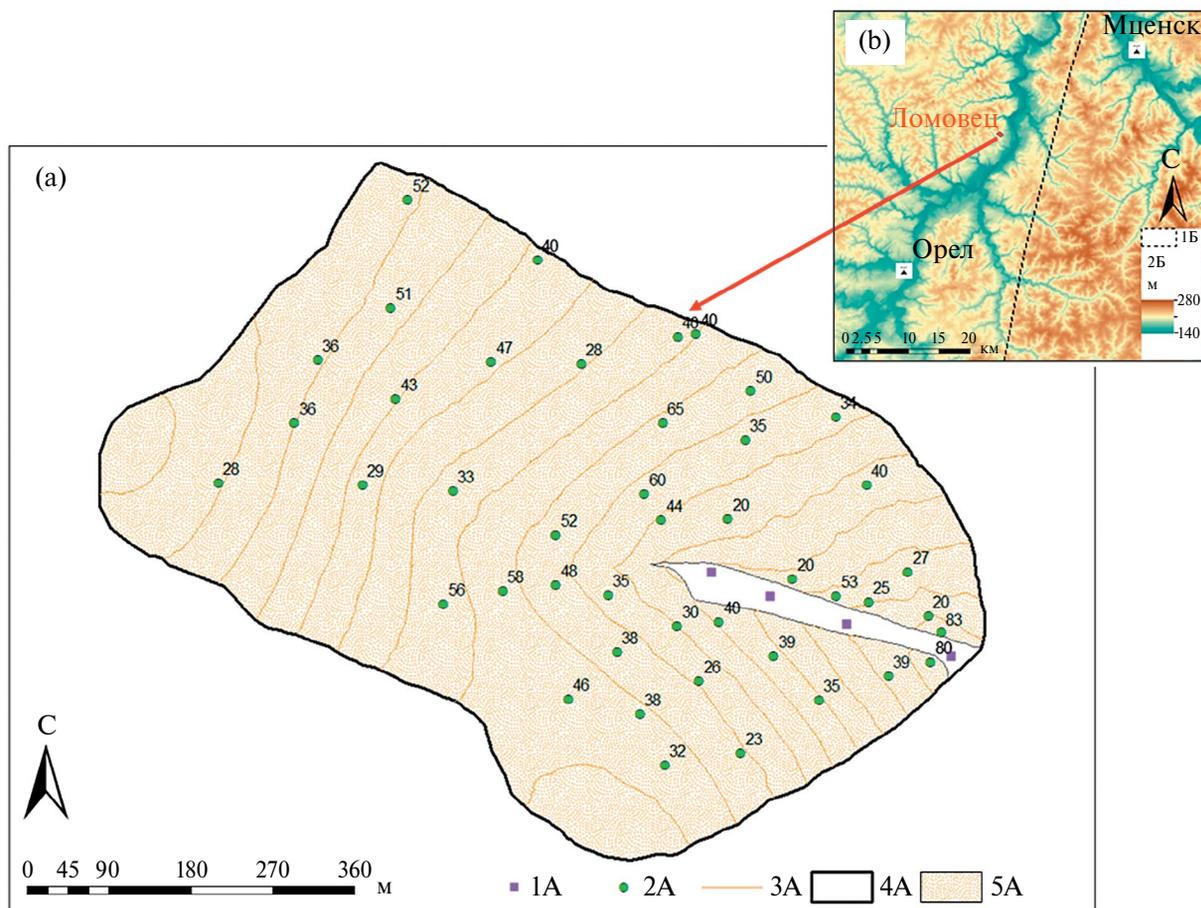


Рис 1. Водосбор Ломовец (а) и его расположение относительно рельефа и крупных городов с метеостанциями в Орловской области (б). 1А – почвенные разрезы и точки послыюного отбора образцов в днище ложбины; 2А – точки бурения почв и отбора образцов из пахотных горизонтов, рядом показана установленная мощность горизонтов А+АВ; 3А – горизонтали с сечением 2 м; 4А – граница водосбора; 5А – распахиваемая часть водосбора; 1Б – граница между лесной и лесостепной областями Русской равнины согласно [16]; 2Б – абсолютная высота, м.

залесенное днище крупной ложбины, дренирующей сток с площади водосбора в вершину оврага, расположенного в лесном массиве на левом борту долины р. Оки. Территория располагается в пределах Окского прогиба, разделяющего наиболее высокие части Среднерусской возвышенности: Новосильское и Дмитровское поднятия [31]. Коренные породы представлены глинами и песками юрского и мелового возраста, перекрытыми комплексом нерасчлененных песчано-суглинистых отложений водно-ледникового и аллювиального происхождения, залегающих на днепровской морене.

Почвенный покров Орловской области крайне неоднородный, в его составе 12 почвенных типов. Серые лесные почвы занимают 953 тыс. га или 46.3% площади сельхозугодий и 876 тыс. га площади пашни или 52.8% ее площади, в том числе темно-серые лесные (23.8% от площади пашни), серые лесные (22.1% от площади пашни), светло-серые лесные (6.9% от площади пашни) [19]. На малом водосборе Ломовец почвенный покров не очень контрастный.

В пределах пашни встречаются светло-серые лесные (Luvic Greyzemic Phaeozems) и серые лесные почвы (Luvic Retic Greyzemic Phaeozems).

Климатические условия и их изменения во времени во многом определяют интенсивность проявления талого и ливневого смыва на исследуемой территории. Согласно данным метеонаблюдений, основные изменения климата заключаются в постепенном повышении среднегодовых температур воздуха с 4.5°C в 1838–1842 гг. до 7.6°C в 2017–2021 гг. за счет в основном роста зимних температур [26]. При этом тенденция роста происходила на фоне похолоданий. В 40-е гг. XX в. зимняя температура была самой низкой (на 2.0–2.5°C ниже климатической нормы) [22]. Основной прирост температур пришелся на период с середины 1970-х гг. В итоге в последние десятилетия выросла продолжительность теплого времени года, а также существенно снизилась глубина промерзания почв. За последние 5 лет в год выпало 545–790 мм осадков, при этом среднегодовая

сумма осадков с середины до конца XX в. за 50 лет выросла на 141 мм преимущественно за счет весенних (на 40.2%), осенних (32.3%) и зимних месяцев (85.3%) [1].

Большую часть Орловской области (2465.2 тыс. га) по данным официальной статистики [67] на 2022 г. занимали сельхозугодия (2035.3 тыс. га), в составе которых на долю пашни приходилось 1569.7 тыс. га (63.6% от общей площади). Исторический анализ изменений площади пашни для территории нынешней Орловской области с 1695 г. показывает постепенный рост показателя в течение XVII и XIX вв. (рис. S1). Максимальное значение отмечается в 1956 г., за которым последовало сокращение, вплоть до 2011 г., когда площадь пашни была меньше, чем в 1887 г.

Во второй половине XVIII в. в Орловском крае повсеместно существовала трехпольная система земледелия, в дополнение к нему земледельцы использовали приемы других систем: подсечной и залежной. Основными культурами трехполья являлись озимая и яровая рожь, овес, ячмень, пшеница. Так, в XIX в. лесной перелог (лесопольная система) наряду с трехпольем бытовал в лесной полосе Орловщины, а на черноземных территориях трехпольный севооборот дополняли зяблевой вспашкой; озимые сеяли после яровых на этом же поле, а паровое поле засеивалось на следующую весну яровыми. Из-за высокого спроса на некоторые культуры меняли посевы: иногда сеяли ячмень после пшеницы, после ячменя – овес, после овса – гречиху, затем озимую рожь; при севе последней, особенно после гречихи, пашню не пахали, а сеяли по стерне. С 1868 г. многопольный севооборот вводился, прежде всего, в немногочисленных передовых помещичьих хозяйствах. Крестьяне обрабатывали свою землю с помощью одноконной сохи и деревянной бороны. К началу XX в. острая нехватка пахотных угодий, а также высокая арендная плата за нее [18] вынуждала крестьян переходить от трехполья к двуполью, а в некоторых случаях даже к однополюю [11]. С 1897 по 1956 гг. данные о площади пашни/посевов имеются в ограниченном количестве, так как значительно изменялась административная структура Орловской области. С 1913 по 1940 гг. посевная площадь под зерновыми культурами возросла на 19% и составила 1075.9 тыс. га. В 1930-х гг. создавались машинно-тракторная станция по области (например, в 1930 г. была создана Мценская МТС). В 1945 г. посевные площади сельскохозяйственных культур были в 2 раза меньше, чем в довоенные годы, в 1950 г. они были восстановлены на 87% [68].

Анализируя посевные площади под урожай и структуру посевов по доступным официальным статистическим данным с 1970 г. (рис. S2), можно выделить следующие экстремумы: максимальная площадь посевов была в 1975 г. (около 70% от

площади области), минимальная – в 2007 г. (около 40% от площади области), с 2007 г. наблюдается рост посевных площадей. В Орловской области с 2000 г. существенно возросла площадь посевов технических культур и сократилась площадь посевов кормовых культур. Во время проведения полевых исследований в июне и ноябре 2022 г. на исследуемом водосборе выращивалась сахарная свекла. Учитывая, что поле принадлежит компании Рус-Агро, специализирующейся на выращивании сахарной свеклы, можно предположить, что она занимает важное место в современном севообороте.

Методы. Для оценки деградации почв и перераспределения наносов на водосборе Ломовец был проведен комплекс исследований, включающий изучение архивных и исторических картографических материалов, полевые работы с применением набора традиционных и современных методов с отбором образцов почв для проведения лабораторных анализов и расчеты по эрозионной модели WaTEM/SEDEM.

Почвенно-морфологический метод использовали для оценки степени смытости почв за весь период земледельческого освоения [20]. В пределах пашни почвы были изучены в 45 точках, где было проведено бурение с помощью почвенного бура Эдельмана до иллювиального горизонта (B), т.е. в среднем до глубины около 1 м. В каждой точки обследования из пахотного горизонта брали образцы почв для анализа на содержание органического вещества и гранулометрического состава.

Учитывая высокую вариабельность мощностей почвенных горизонтов на плоских приводо-раздельных участках, было принято решение использовать два варианта эталонов несмытых почв с мощностью горизонтов A+AB, равными 52 см и 56 см (рис. 1). При этом почвы с мощностью горизонтов A+AB 56 см в основном располагаются топографически несколько выше ранее существовавшей грунтовой дороги, соединявшей села Ломовец и Паутово (рис. S3). Тип и степень смытости/намытости почв по площади пашни определяли на основе оценки мощностей почвенных горизонтов в 45 точках, которые размещали по катенам, равномерно распределенным по площади. По результатам проведенной съемки была построена почвенная карта с выделением ареалов почв различного типа и выделением участков с различной степенью смытости/намытости почв.

Суммарные потери почв почвенно-морфологическим методом рассчитывали по стандартной методике [6, 65]. Важно отметить, что расчеты проводили двумя способами: без и с учетом темпов самовосстановления почв. Согласно данным [29], скорость самовосстановления серых лесных почв составляет в среднем 0.35 мм/год. При этом более детальные исследования [23] позволили

установить, что скорость самовосстановления серых лесных почв варьирует в зависимости от степени их деградации и может достигать 1.1 мм/год при сильной степени смывости, а затем снижаться до <0.1 мм/год при средней и низкой степени смывости почв. На исследованном участке Ломовец среди эродированных почв преобладают слабо- и среднесмытые серые лесные почвы, а сильносмытые почвы были диагностированы в единичных профилях почв. Вероятно, скорость самовосстановления почв на участке Ломовец, варьирует от 0.1 до 0.35 мм/год. В расчетах были приняты максимальные скорости самовосстановления эродированных почв, равные 0.35 мм/год, для охвата максимального диапазона оценок темпов эрозии почв на основе почвенно-морфологического метода.

Оценки, полученные с использованием почвенно-морфологического метода, характеризуют суммарные потери почвы, включая водную и механическую эрозию, а также потери почвы при уборке корнеплодов, которые могут составлять от 0.65 до 2.75 т/га в год [28]. Расчет темпов смыва с пашни на основе почвенно-морфологического метода были проведены для 200-летнего временного интервала, который был определен на основании анализа исторических карт и архивных данных.

Радиоцезиевый метод. Для датировки отложенных наносов, накопившихся в днище залуженной ложбины за постчернобыльский и предшествующий ему периоды, использовался радиоцезиевый метод [3]. На основе крупномасштабной геоморфологической съемки днище нераспахиваемой ложбины было разделено на четыре морфологически однородных сектора. В днище нераспахиваемой ложбины, в которой концентрируется сток воды и наносов, поступающий со склонов, внутри каждого сектора был заложен разрез. В каждом из разрезов вскрывалась погребенная почва (рис. S4). Из передней стенки каждого разреза с площади 15 × 15 см послойно через 3 см до глубины 60–81 см (в зависимости от мощности отложений) отбирали образцы для определения содержания ¹³⁷Cs. В лаборатории образцы почв высушивали, растирали, просеивали через сито 2 мм. Гамма-спектрометрический анализ проб почвы проводили на гамма-спектрометрических комплексах с полупроводниковыми детекторами высокого разрешения из особо чистого германия с разрешением 1.95 кэВ по линии 1332 кэВ. Время экспозиции определяли статистически достоверным фиксированием пика ¹³⁷Cs на линии 661.66 кэВ.

По результатам проведения анализов содержания ¹³⁷Cs в послойно отобранных образцах почв построены эпюры вертикального распределения изотопа, на которых выделен пик, датирующий положение поверхности днища на момент выпадения ¹³⁷Cs из атмосферы в мае 1986 г. после аварии на ЧАЭС. Таким образом, толщина отложений,

располагающаяся выше данного пика, накопилась за период с 1986 по 2022 г.

На поперечном профиле через ложбину в створе каждого разреза на разном удалении от него были дополнительно пробурены скважины, для определения суммарной мощности наносов, отложившихся по ширине днища на каждом створе. Мощность наносов, отложившихся за дочернобыльский период в скважинах, определяли по соотношению между мощностью всей аккумулятивной толщи и толщи, отложившейся после 1986 г. в разрезе данного сектора днища. Объем отложившихся в каждом секторе наносов определяли путем перемножения площади каждого сектора на среднюю мощность наносов, а суммарный объем наносов, накопившихся в днище за постчернобыльский период устанавливали сложением объемов отложенных в каждом из четырех секторов.

Инструментальные оценки объемов смыва и аккумуляции после эрозионного события. Во время проведения полевых работ в июне 2022 г. на водосборе Ломовец на посевах сахарной свеклы была обнаружена сеть свежих промоин и аккумулятивных конусов и шлейфов. По данным метеостанций городов Мценск и Орел ([66], дата обращения 11.06.2023) установлено, что ливневые осадки со средним слоем 26 мм, связанные с прохождением фронтальной зоны, наблюдались в период между 18–21 ч 31 мая 2022 г. в г. Мценск. В тот же день им предшествовал утренний дождь 9 мм. При этом, утром того же дня в г. Орле зафиксированы дождь 5 мм и поздно вечером осадки 3 мм. Учитывая расположение водосбора Ломовец между городами Орел и Мценск, можно предположить, что здесь выпало порядка 20 мм.

Были проведены оценки смыва и переотложения свежих наносов в пределах водосбора с использованием детального определения объемов аккумуляции на основе обмера площадей и мощности аккумулятивных форм и оценки выноса материала с пашни. Совместно применяли метод водороин и результаты детальной съемки водосбора с помощью БПЛА. Оценку объемов аккумуляции за эрозионное событие проводили на основе измерения мощности наносов по фиксированным на местности трансектам с шагом 2–3 м для конусов выноса на пашне и по поперечным профилям, располагающимся через 5 м, в днище нераспаханной ложбины. Также по поперечным профилям с шагом в 1 м были проведены измерения ширины и глубины пяти крупных промоин, образовавшихся в разных частях водосбора. Одновременно с помощью БПЛА была проведена съемка местности, по результатам которой был создан ортофотоплан и построена цифровая модель рельефа водосбора с размером пикселя 0.08 м. По ортофотоплану и цифровой модели рельефа были вручную оцифрованы границы: водосбора, крупных (в виде полигонов) и мелких (в виде линий) промоин, конусов выноса наносов

и дна залуженной ложбины. Это позволило рассчитать площади зон смыва и аккумуляции. Были сопоставлены параметры промоин, измеренные в поле методом водороин и полученные на основе съемки с БПЛА. Площади дна крупных промоин, полученные на основе полевых измерений и по ортофотоплану, совпали на 97%. В свою очередь глубины промоин, установленные по результатам БПЛА съемки, оказались в 4 раза больше полученных по наземным измерениям. Поэтому для расчета объема крупных промоин использовали площади дна промоин, оцифрованных по съемке БПЛА, и среднюю глубину промоин, выявленную на основе измерений методом водороин. Она составила 2.5 см. Небольшие промоины, читаемые на ортофотоплане, оцифровывали линиями. При расчетах их объемов использовали стандартную ширину 0.5 м и глубину 1 см. Для пересчета объема промоин в массу использовали стандартную плотность серых лесных почв 1.2 г/см³. Объем аккумуляции

оценивали на основе сплайн-интерполяции мощности отложившихся после эрозионного события наносов в предварительно оцифрованных в 202 точках определения мощности аккумуляции. Для пересчета объемов аккумуляции за единичное эрозионное событие в массу наносов использовали плотность 0.9–1 г/см³.

Важно отметить, что нижней границей водосбора является грунтовая дорога, которая гипсометрически располагается несколько выше дна залуженной ложбины. Она создает подпор на пути стока воды и наносов по залуженной ложбине в направлении вершины оврага. В результате большая часть смытых с пашни наносов, за исключением тонких фракций, переносимых во взвеси, аккумуляровалась в пределах водосбора и была учтена. Отсутствие свежих отложений в днах ложбины на участке, расположенном в лесу между грунтовой дорогой и уступом овражного вреза (рис. 2), подтверждает данное предположение.

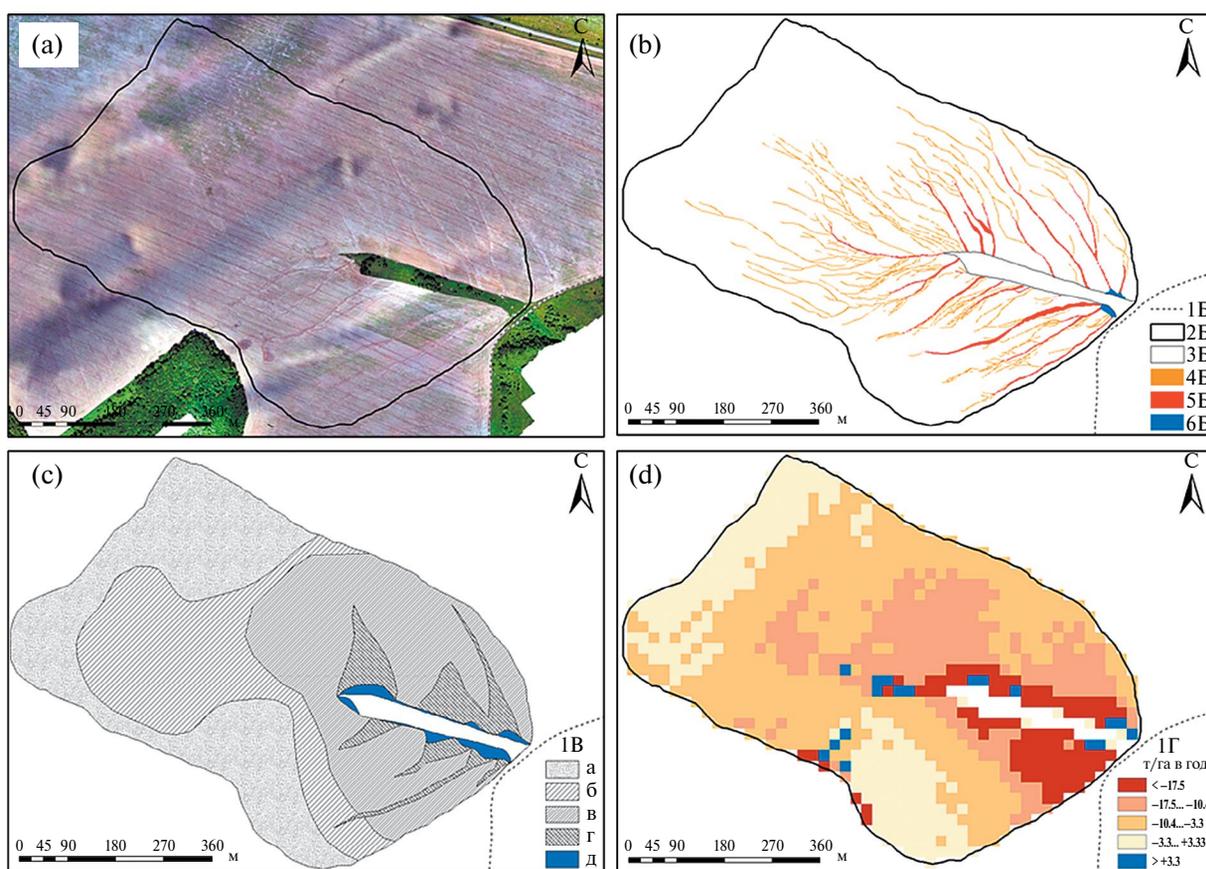


Рис. 2. а – ортофотоплан водосбора Ломовец; б – карта-схема сети промоин и крупных конусов выноса; с – карта эродированности почвенного покрова; д – карта расчетных темпов эрозионно-аккумулятивных процессов на водосборе Ломовец. 1Б – грунтовая дорога; 2Б – граница водосбора; 3Б – граница залуженной с отдельными деревьями и кустарниками части водосбора; 4Б – небольшие промоины; 5Б – крупные промоины, в основном сформировавшиеся по днам потяжин, хорошо выраженным в рельефе; 6Б – крупные конуса выноса на краю пашни; 1В – степень смывистости почв: а – несмытые, б – слабо-, в – средне-, г – сильносмытые, д – намытые; 1Г – темпы эрозии почв (–) и аккумуляции наносов (+).

Расчеты темпов эрозионно-аккумулятивных процессов по модели WaTEM/SEDEM. Основной блок WaTEM/SEDEM [61, 63] для расчета смыва базируется на модифицированном уравнении RUSLE [55] и включает схожие параметры. Эрозионный индекс осадков был взят из базы данных Global Rainfall Erosivity [52]. Почвозащитный коэффициент севооборотов изменялся во времени в связи с различным набором культур, включенных в севооборот. Для реконструкции севооборотов использовали обобщенные данные по площадям посевов различных культур и используемых севооборотов из справочной литературы и архивных источников. Эродируемость почв рассчитывали на основе аналитических данных о свойствах почв. Содержание органического вещества определяли по методу Тюрина с фотоколориметрическим окончанием [10], гранулометрический состав почвы – методом седиментации [9]. Подробный анализ свойств почв и их эродируемости представлен в работе [35]. Для расчета LS-фактора использовали цифровую модель рельефа, созданную на основе съемки рельефа БПЛА с разрешением ячейки 20 × 20 м для учета влияния мезорельефа. Обработку полученных данных проводили в программах ArcGIS 10.5, SAGA GIS и WaTEM/SEDEM v2004.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Реконструкция продолжительности сельскохозяйственного освоения водосбора Ломовец. Водосбор Ломовец на период проведения Генерального межевания в 1785 г. в основном не использовался в качестве пашни. Только примерно 10% от общей площади было распахано. Вплоть до середины 1820-х гг. данная территория была слабо заселена, так как находилась в стороне от основных торговых путей. Так, на подробной карте Российской Империи и близлежащих заграничных владений, изданной в 1816 г. [33], с. Ломовец и близлежащие деревни не показаны. Однако уже на Специальной карте западной части России Шуберта 1832 г. издания того же масштаба, что и карта 1816 г., оно показано. Но главное – на карте 1832 г. изображена дорога с переправой через р. Оку рядом с с. Ломовец, которая соединяет старые торговые пути: Орел–Мценск и Орел–Болхов. На Трехверстовой военно-топографической карте издания 1861 г. вся территория водосбора, за исключением днища и бортов ложбины, показана как пашня. В этой связи можно с высокой долей уверенности утверждать, что продолжительность распашки водосбора составляет 200 ± 10 лет. Информация со старых карт разных лет издания позволяет предполагать, что с первой четверти XIX в. и вплоть до середины XX в. по подножию склона южной части водосбора вдоль ложбины проходила грунтовая дорога. Она пересекала обрабатываемую часть водосбора

в юго-западном направлении и соединяла села Ломовец и Паутово (рис. S2). В качестве полосы для прогона домашних животных данный путь сохранялся вплоть до 1985 г. Нераспахиваемое днище ложбины, вероятно, до начала 1990-х гг. использовалось для выпаса домашних животных, так как с. Ломовец было большим, и существовал дефицит пастбищ в условиях, когда пойменные луга р. Оки использовались как сенокосы.

Оценка потерь почвы за весь период сельскохозяйственного освоения на основе почвенно-морфологического метода. Результаты детальной почвенно-эрозионной съемки, выполненные для основной части водосбора, занятой пашней, позволили создать карту-схему ареалов почв разной степени смытости. Она отражает суммарные потери почв, обусловленные смывом почвы при ливневом и талом стоке воды, механическое перемещение почвы орудиями ее обработки и вынос почвы с урожаем корнеплодов при их уборке. Кроме того, следует учитывать, что данная территория до ее сельскохозяйственного освоения была облесена. Следовательно, сведение леса предполагало корчевание пней, что также приводило к механическим нарушениям почвы.

Во многом, в связи с этим фактически в качестве эталона в равной мере правомерно принимать почвы с мощностью горизонтов A+AB 52 см и 56 см.

Но следует учитывать, что несмытые почвы мощностью 56 см располагаются в непосредственной близости от существовавшей длительное время грунтовой дороги, а впоследствии скотопрогона, проходивших от верховьев залуженной ложбины по направлению к краю лесного массива, расположенного к юго-западу от водосбора (рис. S3). Можно предположить, что повышенная мощность почв в этих точках может быть связана с намывом почвы.

Темпы эрозии по почвенно-морфологическому методу были рассчитаны с и без учета самовосстановления почв (табл. S1). Кроме того, расчеты были выполнены для трех вариантов пространственной интерполяции данных. Данный подход позволил определить диапазон среднегодового смыва с площади водосбора при допущении распашки всего водосбора за исключением залуженной части в течение всего срока. Для варианта без учета самовосстановления почв темпы выноса почвы за пределы пашни составили 6.9–9.3 т/га в год, а при учете самовосстановления 11.4–13.5 т/га в год.

Отметим, что почвенно-морфологический метод учитывает вклад механической эрозии, темпы которой при отвальной обработке пашни, практикуемой на водосборе, могут быть сопоставимы с интенсивностью водно-эрозионных процессов [62]. Так, в Бельгии на лёссовых почвах темпы механической эрозии составляют 8.7 т/га в год [61]. Однако точность количественных оценок темпов

механической эрозии пока невысока и дополнительные полевые эксперименты необходимы для повышения достоверности расчетных оценок [42]. Тем не менее механическая эрозия способствует перераспределению почвенного материала на пашне, но не выносу его за ее пределы, поэтому влияние данного процесса на балансы наносов небольшое.

Оценка эрозионных потерь почвы за постчернобыльский период. Эпюры вертикального распределения ¹³⁷Cs позволяют достоверно определить накопления смытого материала в днище ложбины с мая 1986 г., когда произошло выпадение ¹³⁷Cs из атмосферы после аварии на ЧАЭС [64, 47]. Слой с максимальным содержанием ¹³⁷Cs соответствует поверхности почвы в момент выпадения изотопа. Соответственно, толща, накопившаяся выше него, отложилась в период с 1986 по 2022 гг. Только в разрезе MVL-2 пик несколько размыт (рис. 3), что вносит небольшую неопределенность с фиксацией поверхности почвы на май 1986 г. Тем не менее, отчетливо прослеживается увеличение слоя аккумуляции наносов за постчернобыльский период от

разреза MVL-4, расположенного в верхней части залуженного участка к разрезу MVL-1, который находится непосредственно выше грунтовой дороги с 24 см до 63 см. Подобная закономерность соответствует структуре стока воды и наносов на данном водосборе, когда часть стока идет вдоль напаша и переливается через нее только ближе к приустьевой части ложбины, где расположен разрез MVL-1. Там же за счет общего падения уклона днища ложбины, ее расширения и подпора, возникающего за счет небольшой насыпи грунтовой дороги, происходит уменьшение скоростей временного водотока.

С использованием данных о мощности аккумулятивных отложений, по результатам ручного бурения по поперечным профилям, были получены с применением разных способов интерполяции точечных данных на площадь залуженной части водосбора величины суммарных объемов аккумуляции за постчернобыльский период и определены среднегодовые темпы аккумуляции в нераспаханной части водосбора (табл. S2). Исходя из допущения, что основной объем наносов, смытых

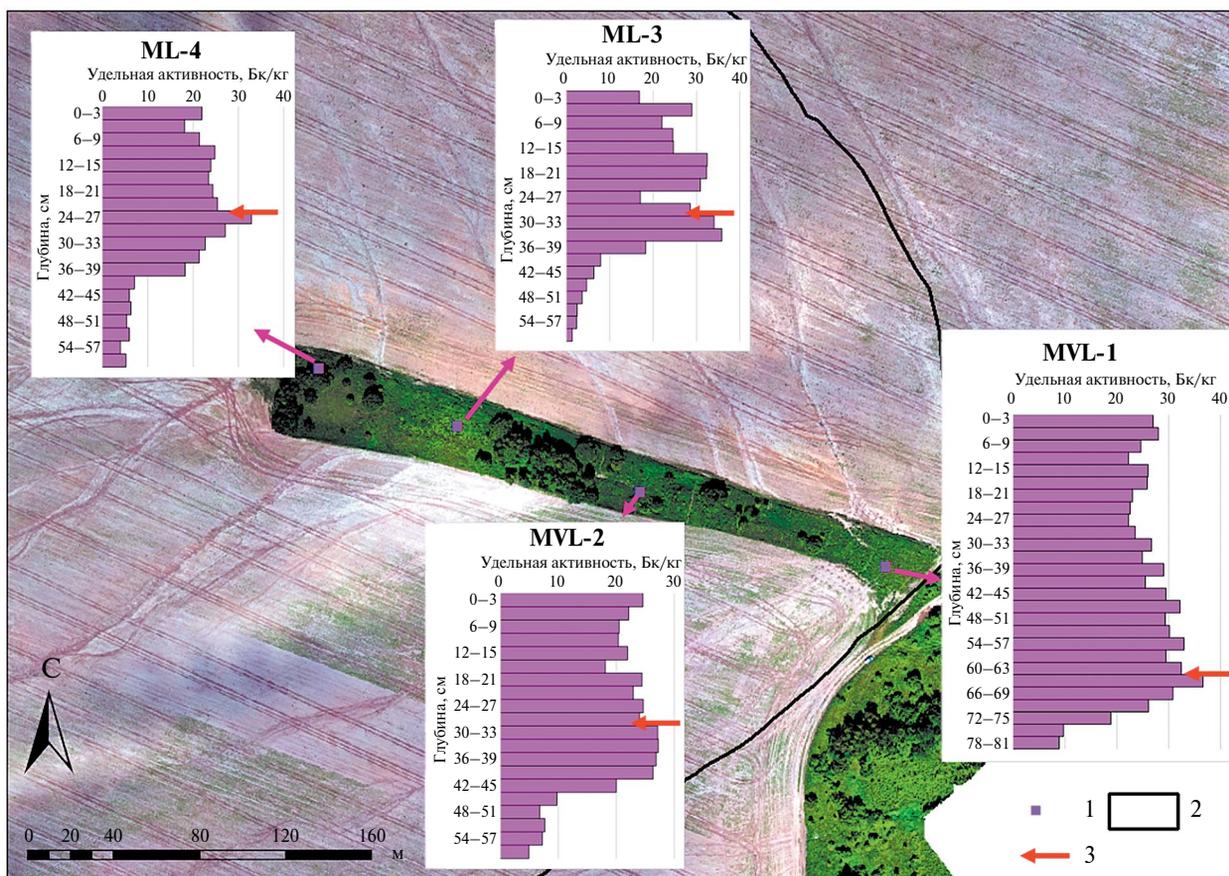


Рис. 3. Расположение почвенных разрезов в днище балки и эпюры распределения удельной активности ¹³⁷Cs по глубине. 1 – местоположение разреза; 2 – грунтовая дорога, 3 – предполагаемая поверхность на момент выпадения ¹³⁷Cs в 1986 г.

с пашни, переотлагался внутри залуженной части водосбора, были получены среднегодовые величины смыва. Они оказались в 1.3–1.8 раз меньше величин смыва за единичное эрозионное событие.

Были проанализированы доступные космические снимки водосбора за период с 1985 г. до момента отбора проб в июне 2022 г. В течение всех 37 лет пашня использовалась в указанных границах, распашка проводилась ежегодно.

При интерпретации оценок эрозии почв на основе радиоцезиевого метода важно учитывать редкую повторяемость и малый слой стока при снеготаянии в период 1987–2020 гг. (табл. 1). Новосильская ЗАГЛОС располагается всего в нескольких десятках километрах к востоку от водосбора Ломовец. Фактически существенное сокращение талого стока началось с 1975 г., которым датируется начало периода потепления климата. При этом в 1987–1998 гг. сток воды в период снеготаяния формировался в основном до 1990 г. Можно предполагать, что в данный интервал времени наряду со стоком воды мог происходить и смыв почвы в период снеготаяния. Но учитывая незначительный слой стока воды, который в среднем за 1987–1998 гг. составил 13–21 мм в зависимости от характера обработки почвы и невысокую мутность стока, характерную для периода снеготаяния [25], он не мог превышать ранее установленный среднегодовой смыв для лесостепной зоны ЕТР, составлявший 1 т/га в год [36]. В XXI в. поверхностный сток в период снеготаяния практически не формировался. Следовательно, подавляющая часть наносов, накопившихся за постчернобыльский период в залуженной части водосбора, является продуктами ливневого смыва.

Темпы смыва за единичное эрозионное событие. Измеренная площадь крупных промоин всего водосбора составила 7580 м², а их суммарный объем 190 м³. Мелкие промоины плохо диагностируются при полевом обследовании, что зачастую приводит к недоучету их вклада [41, 53]. Площадь мелких промоин составила 4370–13100 м² при допущении,

что их глубина равна 1 см, а ширина варьирует от 0.5 до 1.5 м. Объем вымытой из мелких промоин почвы составил 44–131 м³. Общий объем перемещенных за эрозионное событие наносов составляет 234–321 м³, что соответствует 281–385 т при плотности почвы 1.2 г/см³.

Суммарный объем отложений в зонах аккумуляции составил 346 м³, что соответствует 311–346 т с учетом, что плотность свежих наносов равна 0.9–1 г/см³. Таким образом, объемы и масса материала, переотложившегося на границах пашни и в залуженном днище ложбины, оказались сопоставимы с объемом и массой почвы, смытой с пашни. Вклад плоскостного смыва в этих расчетах не учитывался. Отметим, что это частично компенсируется недоучетом переотложения наносов внутри пашни в виде мелких конусов и шлейфов. Темпы смыва с пашни за единичное эрозионное событие составили 6.8–9.4 т/га. Различия в оценках объемов смытого и переотложившего по краю пашни и в залуженном днище почвенного материала составили порядка $10 \pm 5\%$ при сопоставлении с верхним значением величины смыва, определенной на основе обмера сети водороев. Незначительная часть взвешенных наносов транспортировалась совместно со стоком воды за пределы водосбора. Важно отметить, что основной объем смытого с пашни материала переотложился по краю пашни и в нераспаханной части водосбора, включающей собственно ложбину с ее бортами, а также фрагменты подножий южного склона водосбора. Это свидетельствует, что при ливневом смыве подавляющая часть смытых с пашни наносов переоткладывается по нижнему краю полей и на небольшом удалении от них.

Согласно данным наблюдений по двум ближайшим метеостанциям Орел и Мценск, между которыми расположен водосбор, за последние 18 лет в теплое время года в среднем выпадает 2.3–2.9 дождя со слоем 20–30 мм. При этом в мае в среднем выпадает 0.4 дождя, тогда как в июне 1.1. В наиболее эрозионно-опасный период, к которому относятся период с начала мая и до конца

Таблица 1. Обобщенные по временным интервалам характеристики стока в период снеготаяния по данным наблюдений на Новосильской агролесомелиоративной станции за различные интервалы времени (по данным [6, 30])

Годы	Среднегодовой сток воды, мм		Коэффициент стока		Число лет без стока	
	зябь	уплотненная пашня	зябь	уплотненная пашня	зябь	уплотненная пашня
1959–1974	43	53	0.43	0.57	0	0
1975–1986	13	26	0.14	0.22	4	1
1987–1998	13	21	0.16	0.26	4	3
1999–2020	2	2	0.01	0.03	20	18

июня, особенно для посевов пропашных, ежегодно в среднем выпадает 1.5 ливня с аналогичным слюем. Ключевую роль помимо слоя осадков играет их максимальная интенсивность. К сожалению, эти данные отсутствуют. Важно отметить, что в данном случае, судя по структуре сети промоин, слой и интенсивность дождя были достаточно равномерны по всему водосбору.

Оценка темпов перераспределения почв на водосборе с использованием модели WaTEM/SEDEM. Расчеты темпов смыва/аккумуляции наносов на пашни и выноса материала за пределы обрабатываемых склонов представлены в табл. 3S. Оценки перераспределения наносов выполнены для различных севооборотов, один из которых предполагает стандартный набор сельскохозяйственных культур, который использовался начиная с 1950-х гг. и до начала нынешнего столетия с незначительной долей пропашных культур. С середины первого десятилетия 2000-х гг. в Орловской области стала нарастать доля площадей пашни под посевами пропашных культур, к которым относятся сахарная свекла (фабричная), масличные культуры, соя, рапс, горчица. К настоящему времени она увеличилась в 3.8 раза с 2000 г., тогда как площадь посевов кормовых культур с 2000 г. снизилась практически в 2.8 раза. Так как пашня водосбора Ломовец принадлежит компании РусАгро, которая специализируется на выращивании сахарной свеклы для производства сахара, то использование коэффициента почвозащитной роли севооборотов 0.45 представляется обоснованным для оценки темпов

перераспределения наносов за последние десятилетия. Кроме того, в период с начала распашки и минимум до начала XX в. в Орловской области использовали трехпольный севооборот, который включал пар, почвозащитный коэффициент севооборотов также был равен 0.45 [15].

ОБСУЖДЕНИЕ

Изменения темпов перераспределения наносов на водосборе за разные интервалы времени. В обобщенном виде результаты определения перераспределения наносов на водосборе Ломовец за разные интервалы времени представлены в табл. 2. Точность определения темпов и объемов перемещенного материала при каждом из используемых методов не абсолютна, но достаточна для выявления трендов и их флуктуаций во времени. Морфологические особенности склонов водосбора не способствуют переотложению значительных объемов наносов по пути их транспортировки к нижнему краю поля, поэтому при использовании почвенно-морфологического метода не было выявлено участков намывных почв повышенной мощности. Последствия эрозионного события показывают, что аккумулятивные конусы, сформировавшиеся по пути транспорта наносов внутри пашни, небольшие по площади и мощности отложений.

Консервативные факторы (рельеф и противоэрозионная устойчивость почв) мало меняются в течение 200 лет распашки водосбора. Изменения темпов эрозии почв во времени преимущественно

Таблица. 2. Результаты оценок перераспределения наносов на пашне водосбора Ломовец, полученные на основе использования различных методов, т/га в год

Параметр	Метод			
	БПЛА съемка и метод водороев	радиоцезиевый	почвенно-морфологический	эрозионное моделирование
Интервал времени	Эрозионное событие 31 мая 2022 г.	1986–2022 гг.	1820–2022 гг.	50 ± 25 лет от 2022 г.
Темпы перемещения наносов внутри пашни без учета аккумуляции наносов	6.8–9.4	—	11–12* 7–8	8.9–13.5
Темпы аккумуляции наносов на склонах (без учета аккумуляции на границе пашни с нераспахиваемым днищем ложбины)	Трудно определить	—	0.8* 1.3	0.8–2.3
Темпы выноса наносов за пределы пашни	8	4.2–6.9	10.7* 6.2	8.1–11.2**

* С учетом самовосстановления почв.

** С учетом аккумуляции у нижней границы пашни.

контролируются: а) условиями формирования такого стока, повторяемостью и распределением внутри теплого времени года стокоформирующих ливней; б) набором высеваемых сельскохозяйственных культур, периодичностью и способами обработки почвы; в) изменением границ полей.

Сокращение склонового поверхностного стока в период снеготаяния, начиная с последней четверти XX в., затронуло не только север лесостепной зоны ЕТР, но и распространилось на большей части южной половины Восточно-Европейской равнины [17]. Аналогичная тенденция отчетливо проявляется и на равнинах умеренного пояса Центральной и Западной Европы [49]. Одновременно происходит усиление интенсивности и повторяемости ливневых осадков в Германии и в целом в Европе. Число стокоформирующих ливней выросло в Германии на 45% в период 1981–2013 гг., по сравнению с периодом 1960–1980 гг. [43].

В отличие от Западной и Центральной Европы для ЕТР и ее центральной части пока характерны разнонаправленные тенденции изменений повторяемости ливней [40]. Статистически значимый рост повторяемости сильных ливней прослеживается только в Предкавказье, а также на юго-западе ЕТР России [39].

Согласно результатам длительного мониторинга эрозии почв на пашне, основным фактором, контролирующим ее темпы, является проективное покрытие почв [41, 54]. В этой связи для водосбора Ломовец, как и в целом Орловской области, ключевым изменением в части тренда темпов смыва в последние 20 лет стало существенное увеличение доли пропашных культур в севооборотах. Тем самым, оценки интенсивности смыва, полученные на основе радиоцезиевого метода, характеризуют, с одной стороны, интервал времени с полным доминированием ливневого смыва, а с другой стороны, около половины данного временного интервала приходится на период с резким увеличением доли пропашных культур в севообороте. Таким образом, можно утверждать, что современные среднегодовые темпы смыва на водосборе Ломовец точно превышают среднегодовые потери почвы за постчернобыльский период.

Расчеты темпов выноса почвенных частиц с пашни, полученные на основе расчетов по модели WaTEM/SEDEM, несколько больше этих значений, но они включают переотложение смытых наносов по краю пашни. Результаты съемки водосбора с БПЛА и обмеры аккумулятивных тел, сформировавшихся на границе пашни и нераспахиваемых подножий склоны и ложбины, позволили установить, что здесь переотложилось около 55% смытого со склонов почвенного материала. Согласно расчетам модели, среднегодовой вынос материала за пределы пашни составляет 3.1–3.5 т/год,

т.е. на долю аккумуляции по краю пашни, приходится 61–68% от суммарного расчетного объема, вынесенного к краю поля и за его пределы материала. В настоящем случае в расчетах не использовали блок расчета механической эрозии, так как она приводит к перераспределению почвенного материала внутри пашни, но не выносу за ее пределы. Большая плавность склонов водосбора, за исключением сети потяжин в северной половине водосбора, предполагает относительно равномерное и незначительное смещение почвы вниз по склону по его длине. Кроме того, обработка почвы с использованием сельскохозяйственной техники велась на водосборе Ломовец только последние 70–80 лет. При пахоте с использованием в качестве тягловой силы лошадей вклад механической эрозии в перераспределение почвы внутри пашни многократно ниже.

Изменения границ полей являются существенным фактором, влияющим на перераспределение наносов [57, 65]. Так, укрупнение полей при переходе от частных наделов к коллективным хозяйствам, которое происходило повсеместно в конце 1920-х гг. и начале 1930-х гг., вероятно, стимулировало усиление темпов смыва за счет увеличения протяженности линий тока и площадей микроводосборов. Отсутствие детальных картографических материалов вплоть до колхозного периода не позволяет достоверно судить о числе крестьянских наделов на исследуемом водосборе. Из исторических документов известно, что к началу XX в. в Орловской губернии были самые малые по сравнению с соседними регионами размеры земельных наделов из-за высокой плотности сельского населения [18], что вынуждало крестьян переходить от трехполья к двуполью, а в некоторых случаях даже к однополюю. Крестьяне обрабатывали свою землю с помощью одноконной сохи и деревянной бороны [11]. Можно предположить, что крестьяне с Ломовец, на границе которого расположен водосбор, также имели ограничения по площади земельных наделов. Подобная ситуация, вероятно, существовала вплоть до коллективизации. Возможно, что именно в этот период сформировались потяжины, особенно хорошо выраженные в рельефе левого борта водосбора и располагающиеся на относительно равном расстоянии друг от друга (рис. 2b). Они могли возникнуть за счет размыва межей между наделами крестьян. В любом случае характер обработки почвы в этот период способствовал поддержанию ее водопроницаемости, что снижало вероятность формирования ливневого стока и смыва. Талый сток, преимущественно, концентрировался по межам между наделами, которые служили удобным путем для сброса воды. Укрупнение полей произошло в начале 1930-х гг., но наиболее значимые изменения условий формирования стока произошли во второй половине

XX в. В этот период стала использоваться сельскохозяйственная техника для обработки почвы и посевов, а также уборки урожая, что сказалось на ухудшении структуры серых лесных почв [34] и на их водопроницаемости, которая сократилась в связи с формированием переуплотненного слоя ниже пахотного горизонта. Таким образом, правомерно предполагать, что до начала обработки почв с использованием сельскохозяйственной техники среднегодовые темпы смыва были несколько ниже, чем в период с начала 1950-х гг. и до настоящего времени.

Таким образом, полученные оценки за разные периоды свидетельствуют о существенных флуктуациях темпов эрозионно-аккумулятивных процессов за прошедшие 200 лет. Среднеголетние оценки эрозии почв за агрикультурный период колеблются от 7 до 12 т/га в год согласно почвенно-морфологическому методу. В доиндустриальный период темпы плоскостного и ручейкового смыва, вероятно, не могли быть высокими в связи с небольшими размерами отдельных полей и грубой обработкой почвы с использованием сохи [32]. В середине XX в. произошло существенное увеличение темпов эрозии почв. Наиболее сильный смыв, наблюдался в 1960-е—1980-е гг. в условиях одновременного воздействия ливневого и талого смыва, использования тяжелой тракторной и уборочной техники, а также распашки укрупненных пахотных угодий. В последние 30 лет темпы эрозии почв снова снизились. Согласно оценкам по радиоцезиевому методу, темпы смыва за постчернобыльский период составили 4.2—6.9 т/га в год, что меньше среднеголетних темпов эрозии почв за весь агрикультурный период. Такое снижение темпов эрозии почв в последнее десятилетие характерно в целом для ЕТР [5, 7, 12]. Уменьшению темпов эрозионных потерь в последние десятилетия преимущественно способствовало резкое сокращение талого смыва в результате глобального потепления. Также в период до середины 2010-х гг. пашня водосбора была разделена на ряд самостоятельных полей, которые меняли форму и площадь в разные годы, что могло способствовать частично-перееотложению наносов на их границах.

В последнее десятилетие в Орловской области наметился тренд возрастания темпов эрозии почв за счет увеличения доли пропашных культур (рис. S2). Согласно расчетным данным по модели WaTEM/SEDEM, такие изменения в составе севооборотов могут привести к повышению темпов эрозии почв выше среднеголетних за агрикультурный период в случае отсутствия применения специализированных агротехнических или иных противоэрозионных мероприятий.

Пространственные изменения эрозионно-аккумулятивных процессов по площади водосбора. Для борьбы с эрозией почв важное значение имеет

не только суммарные темпы эрозии почв, но и пространственная структура эрозионно-аккумулятивных процессов. Традиционным (визуально-экспертным) методом была создана карта эродированности почв водосбора Ломовец (рис. 2с). Карты расчетных темпов смыва почв (рис. 2d) были преобразованы с учетом соответствия степени эродированности почв и темпов эрозионных потерь, умноженных на длительность распашки (табл. S4).

На основе полученных картографических материалов были рассчитаны суммарные площади ареалов почв разной степени смытости и намытости. Оценка площадей почв разной степени деградации на основе мощностей гумусированной толщи проведены по четырем картам: визуально-экспертного картографирования (рис. 2с), а также автоматических способов интерполяции: кригинг, метод обратных взвешенных расстояний и сплайн. На рис. 4 показаны средние значения полученных результатов, а также пределы погрешностей, соответствующие минимальным и максимальным значениям. Полученные результаты демонстрируют очень высокую вариабельность в оценках площадей несмытых и слабосмытых почв на основе использования разных методов интерполяции точечных данных. Применение автоматической интерполяции показало значительно меньшую площадь несмытых почв, но при этом большую площадь слабосмытых почв по сравнению с визуально-экспертным картографированием. Кроме того, применение автоматической интерполяции очевидно недостаточно четко охарактеризовало суммарную площадь небольших ареалов сильносмытых и намытых почв, занизив их площади, по сравнению с визуально-экспертным способом.

В свою очередь площади почв разной степени деградации на основе моделирования были рассчитаны для двух сценариев с использованием значений С-фактора 0.29 и 0.45, а также с/без учета самовосстановления почв по аналогии с балансовыми оценками.

Оценки площадей и пространственной структуры потенциальной деградации почв от эрозии по эрозионной модели (рис. 2d) значительно совпадают с пространственным распределением почв разной степени эродированности, оцененных на основе визуально-экспертного картографирования (рис. 2с).

Больше всего ареалы почв разной степени эродированности на обеих картосхемах схожи в северной и западной частях водосбора. Наиболее значительные отличия выявляются на юге водосбора, где расчетные данные существенно больше значений, установленных на основе применения почвенно-морфологического метода. Следует учитывать, что несмотря на достаточно высокую плотность

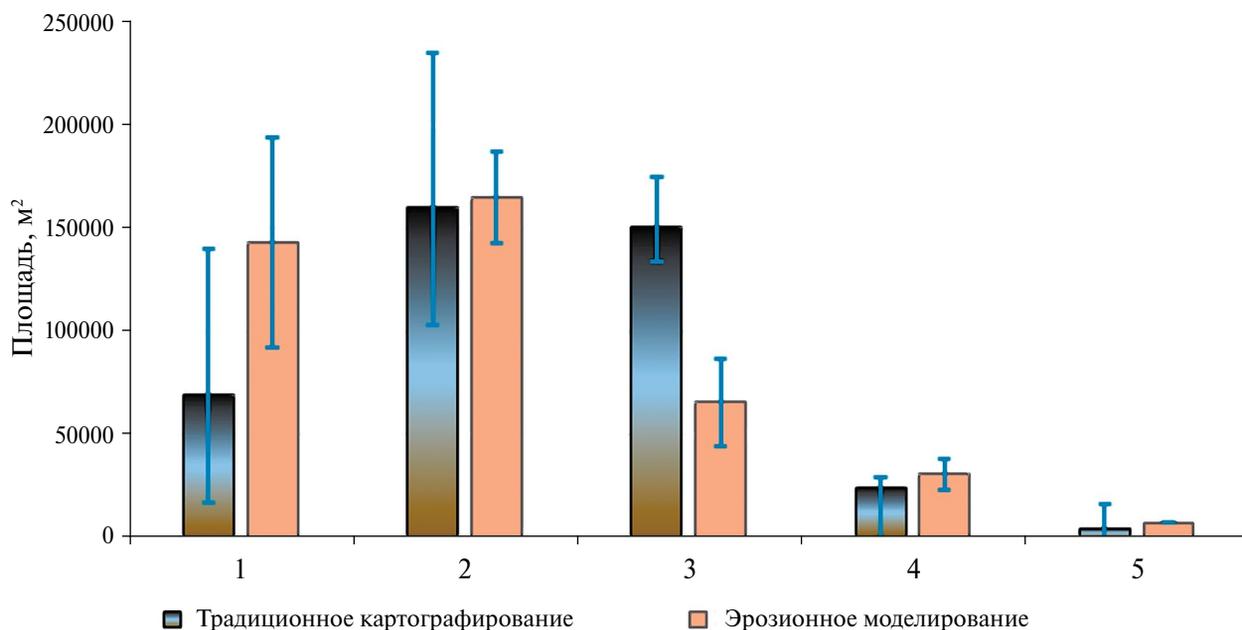


Рис. 4. Суммарная площадь ареалов почв разной степени смывости, полученные на основе морфологических свойств почв и эрозионного моделирования: 1 – несмытые, 2 – слабо, 3 – средне, 4 – сильносмытые, 5 – намывые.

точек обследования, выделения отдельных контуров почв не в полной мере обосновано.

В ряде случаев, например, внутри контура среднесмытых почв на северном склоне искусственно игнорируются две точки, в которых выявлены аномально высокие значения мощностей горизонтов А+АВ. Возможно, повышенная мощность в них обусловлена высокой аккумуляцией наносов на данном участке склона, связанной с наличием искусственной преграды. Например, в 1960-е гг. на зиму в поле часто оставляли стога соломы. Данная солома использовалась для прикорма скота в зимнее время, а также для постилок на бетонных полах в коровниках. В то же время для основной части склона северной половины водосбора отмечается хорошая пространственная сходимости контуров, полученных на основе двух независимых методов.

Причин существенных различий между площадями контуров сильносмытых почв на склоне южной половины водосбора, полученных на основе применения двух независимых методов, может быть несколько. Во-первых, граница пашни за весь период сельскохозяйственного освоения могла смещаться, так как именно здесь проходила грунтовая дорога между селами Ломовец и Паутово (рис. S3). Во-вторых, нельзя исключать, что периодически нижняя часть данного склона не пахалась и использовалась в качестве пастбища, например, это видно на снимке 1985 г. (рис. S5). В итоге периодического смещения границы пашни потери почвы при смыве за один период времени компенсировались переотложением наносов в другие временные

интервалы. Подобная ситуация весьма характерна для пахотных угодий и часто находит документальное подтверждение [45, 57, 65]. В итоге фактическая степень смывости нижней части данного склона несколько ниже расчетной, так как расчеты по модели базируются на существующей в настоящее время структуре землепользования.

Наконец, результаты многолетних мониторинговых наблюдений на конкретных полях, расположенных в пределах компактных территорий, свидетельствуют об очень высокой пространственно-временной вариабельности эрозии, связанной как с различиями в наборе культур, высеваемых на соседних полях в конкретный год, так и с существенными различиями в интенсивности и слое ливневых осадков на небольшом расстоянии [3, 53]. Так, 17-летний мониторинг 86 полей смыва почв на севере Германии позволил оценить величины среднегодового смыва в 0.85 т/га в год с диапазоном 0.2–2.81 т/га в год. Но максимальный зафиксированный смыв с одного поля составил 53 т/га за событие [59].

Структура промоинно-ручeyковой сети, сложившаяся в результате единичного эрозионного события, в целом очень хорошо соответствует контурам почв с различной степенью смывости, созданной на основе расчетов по эрозионной модели (рис. 2b). Так, в сравнительно пологом западной части водосбора нет крупных промоин, но густота мелких промоин увеличивается по длине склона. Крупные промоины равномерно распространены на южном и северном склонах водосбора с ростом

их числа и размеров вниз по склону. К сожалению, в настоящем исследовании не использовались машинное обучение, при применении которого повышается точность картирования на основе съемок, выполненных с дрона. Но в любом случае оценить вклад плоскостного смыва даже в этом случае невозможно [50].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Детальное изучение процессов эрозии и аккумуляции на малом пахотном водосборе Ломовец с использованием набора полевых методов позволило оценить темпы перераспределения наносов за различные интервалы времени от всего периода земледельческого освоения до единичного эрозионного события и оценить пространственное распределение участков смыва/намыва почв.

Среднегодовые потери почвы за счет водной (талой и ливневой) и механической эрозии, а также потерь почвы с урожаем за весь период земледельческого освоения составили 6.2–9.3 т/га в год. При этом в данном случае вклад водной эрозии почв в суммарные потери является доминирующим, так как общая плавность склонов водосбора снижает эффект перераспределения почвенного материала за счет механической эрозии. Данные о динамике изменений площадей эродированных почв в Орловской области позволяют утверждать, что в период с конца 1950-х гг. произошло резкое усиление темпов потерь почвы, что обусловлено повсеместным использованием тяжелой сельскохозяйственной техники, а в последние годы отчасти с ростом доли потерь почв при уборке корнеплодов.

С использованием радиоцезиевого метода определены объемы наносов, смытых с пашни и накопившихся в задернованной ложбине за постчернобыльский период (1986–2022 гг.), что позволило оценить среднегодовые потери почвы с распаханной части водосбора в 4.2–6.9 т/га в год в основном за счет ливневого смыва. Данные наблюдений за талым стоком на Новосильской ЗАГЛОС указывают на его резкое сокращение вплоть до прекращения в последние 20 лет. В результате сокращения талого смыва темпы смыва за постчернобыльский период оказались меньше среднесреднегодных темпов эрозии почв за весь агрикультурный период.

Увеличение доли пропашных культур в составе севооборотов как в целом в Орловской области, так и конкретно на исследованном водосборе в последние десятилетия способствует возрастанию темпов водной эрозии почв. Согласно расчетам по модели WaTEM/SEDEM, такие изменения в составе севооборотов могут привести к повышению темпов эрозии почв выше среднесреднегодных за агрикультурный период в случае отсутствия

применения специализированных агротехнических или иных противоэрозионных мероприятий.

На основе оценок потерь почвы за счет ливневого стока и смыва и переотложившихся по нижнему краю поля и в залуженной ложбине за эрозионное событие наносов установлено, что не более 10% смытой почвы было вынесено со стоком за пределы водосбора, 55% смытых наносов переотложилось в конусах выноса и шлейфах, образовавшихся на границе пашни и залуженной части водосбора. Оставшиеся 35% наносов переотложилась в днище и на бортах частично закустаренной и залесенной ложбины. Пространственная структура единичного эрозионного события оказалась в значительной степени близка пространственной структуре расположения ареалов смытых и намытых почв, сформировавшихся за весь агрикультурный период.

Оценки потерь почвы с использованием модели WaTEM/SEDEM в целом сопоставимы с результатами определения потерь почв на основе почвенно-морфологического метода при условии учета перераспределения наносов до нижних границ пашни. Пространственное размещение контуров и суммарные площади ареалов почв разной степени смытости и намытости на картах, составленных на основе почвенно-эрозионного картографирования и расчетов по модели, в значительной степени совпадают. Это является свидетельством адекватного учета в модели механизмов перераспределения почвы процессами водной эрозии.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-17-00071, <https://rscf.ru/project/22-17-00071/>).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Онлайн-версия содержит дополнительные материалы, доступные по адресу <https://doi.org/10.31857/S0032180X24050076>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Амелин А.В., Петрова С.Н.* Особенности изменений климата на территории Орловской области за последние 100 лет и их влияние на развитие растениеводства в регионе // Вестник Орловского гос. аграрного ун-та. 2006. № 2–3. С. 76–79.
2. *Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Капустина Е.А., Барабанова Е.А.* Природно-климатические и антропогенные изменения стока Волги и Дона //

- Фундаментальная и прикладная климатология. 2016. № 2. С. 55–78.
<https://doi.org/10.21513/2410-8758-2016-2-55-78>
3. *Голосов В.Н.* Использование радиоизотопов при исследовании эрозионно-аккумулятивных процессов // Геоморфология. 2000. № 2. С. 26–33.
 4. *Голосов В.Н., Беляев В.Р., Маркелов М.В., Шамшурина Е.Н.* Особенности перераспределения наносов на малом водосборе за различные периоды его земледельческого освоения (водосбор Грачева Лощина, Курская область) // Геоморфология. 2012. № 1. С. 25–35.
<https://doi.org/10.15356/0435-4281-2012-1-25-35>
 5. *Голосов В.Н., Геннадиев А.Н., Олсон К.Р., Маркелов М.В., Жидкин А.П., Чендев Ю.Г., Ковач Р.Г.* Пространственно-временные особенности развития почвенно-эрозионных процессов в лесостепной зоне Восточно-Европейской равнины // Почвоведение. 2011. № 7. С. 861–869.
 6. *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.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X22100045>
 7. *Голосов В.Н., Иванова Н.Н., Гусаров А.В., Шарифуллин А.Г.* Оценка тренда деградации пахотных почв на основе изучения темпов формирования стратоземов с использованием ¹³⁷Cs в качестве хрономаркера // Почвоведение. 2017. № 10. С. 1–15.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X17100033>
 8. *Голосов В.Н., Маркелов М.В., Беляев В.Р.* Современные тенденции перераспределения наносов в центре Русской равнины // Эрозия почв и русловые процессы. 2010. Т. 17. С. 46–60.
 9. ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава.
 10. ГОСТ 26213-91. Почвы. Методы определения органического вещества.
 11. *Гулярян А.Б.* Состояние сельского хозяйства Орловской губернии в конце XIX века и роль земств в его улучшении // Вестник ОрелГау. 2006. № 2–3 С. 116–123.
 12. *Гусаров А.В., Шарифуллин А.Г., Голосов В.Н.* Современный тренд эрозии пахотных черноземов обыкновенных Приволжской возвышенности (Саратовская область) // Почвоведение. 2018. № 12. С. 1517–1538.
<https://doi.org/10.1134/S0032180X18120043>
 13. Доклад об экологической ситуации в Орловской области в 2021 году.
 14. *Иванова Н.Н., Голосов В.Н., Сидорчук А.Ю.* История земледельческого освоения европейской части России и его влияние на развитие эрозионных процессов // Пространственно-временные закономерности развития современных процессов природно-антропогенной эрозии на Русской равнине. Казань, 2019. С. 17–35.
 15. *Иванова Н.Н., Фомичева Д.В., Рухович Д.И., Шамшурина Е.Н.* Ретроспективный анализ истории земледельческого освоения и оценка темпов эрозии почв в бассейне р. Локна, Тульская область // Почвоведение. 2023. № 7. С. 872–886.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X22601475>
 16. Карта физико-географического районирования СССР. Масштаба 1: 8 млн. М., 1983.
 17. *Кашутина Е.А., Ясинский С.В., Коронкевич Н.И.* Весенний поверхностный склоновый сток на Русской равнине в годы различной водности // Известия РАН. Сер. Географическая. 2020. № 1. С. 37–46.
<https://doi.org/10.31857/S2587556620010100>
 18. *Ковальченко И.Д., Бородкин Л.И.* Аграрная типология губерний Европейской России на рубеже XIX–XX веков // История СССР. 1979. № 1. С. 59–95.
 19. *Коротеев В.И.* Агроэкологическая оценка темно-серых лесных почв юга Нечерноземья. Дис. ... канд. с./х. наук. Курск, 2005. 194 с.
 20. *Ларионов Г.А., Кирюхина З.П., Самодурова Л.С.* Определение темпов смыва методом парных разрезов // Эрозия почв и русловые процессы. 2000. Вып. 12. С. 63–70.
 21. *Ларионов Г.А.* Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки. М.: Изд-во МГУ, 1993. 200 с.
 22. *Лебедева М.Г., Крымская О.В., Толстопятова О.С.* Климатические условия Белгородской области // Географический атлас Белгородской области: природа, общество, хозяйство. Белгород: Константа, 2018. С. 71–76.
 23. *Лисецкий Ф.Н., Голусов П.В.* Воспроизводство сельскохозяйственных земель подверженных эрозионной деградации // Доклады Рос. акад. с./х. наук. 2012. № 3. С. 33–37.
 24. *Литвин Л.Ф., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф., Добровольская Н.Г.* География динамики земледельческой эрозии почв на Европейской территории России // Почвоведение. 2017. № 11. С. 1390–1400.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X17110089>
 25. *Литвин Л.Ф.* География эрозии почв сельскохозяйственных земель России. М.: ИКЦ Академника, 2002. 255 с.
 26. *Лукашина, П. И., Хархардина Е.Л.* Динамика изменения климата на территории Орловской области 2015–2021 гг. // Природные ресурсы: состояние и рациональное использование. Матер. Междунар. науч.-пр. конф. Орел, 15–16 декабря 2021 года. Орел: Орловский гос. ун-т им. И.С. Тургенева, 2022. С. 240–245.
 27. *Ляхов М.Е.* Климатические экстремумы в центральной части Европейской территории СССР

- в XIII–XX веках // Изв. АН СССР. Сер. География. 1984. № 6. С. 68–74.
28. Мельничук М.М., Мольчак Я.А. Определение роли отчуждения мелкозема с урожаем пропашных культур в проявлении эрозии // Двенадцатое межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов: краткие сообщения. Пермь, 1997. С. 104–105.
 29. Пацукевич З.В., Геннадиев А.Н., Герасимова М.И. Допустимый смыв и самовосстановление почв // Почвоведение. 1997. № 5. С. 634–641.
 30. Петелько А.И., Панов В.И. Характеристика поверхностного стока талых вод с разных угодий за 50 лет // Вестник АПК Ставрополя. 2014. № 4. С. 155–162.
 31. Раскатов Г.И. Геоморфология и неотектоника территории Воронежской антеклизы. Воронеж: Изд-во Воронеж. ун-та, 1969. 164 с.
 32. Соболев С.С. Развитие эрозионных процессов европейской на территории европейской части России и борьба с ними. Т. 1. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1948. 305 с.
 33. Подробная карта Российской империи и близлежащих заграничных владений, подготовленная Собственным Его Императорского Величества Депо карт. М–б 20 верст в 1 дюйме. 1816 г.
 34. Уткаева В.Ф., Сапожников П.М., Щепотьев В.Н. Влияние уплотняющего действия сельскохозяйственной техники на почвенную структуру // Почвоведение. 1986. № 2. С. 54–62.
 35. 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. 314–358. <https://doi.org/10.31857/S0032180X24020116>
 36. Чернышев Е.П. Тенденции изменения эрозии на территории Южной части Русской равнины // Вопросы антропогенных изменений водных ресурсов. М.: Изд-во АН СССР. 1976. С. 47–63.
 37. Beuselink L., Steegen A., Govers G., Nachtergaele J., Takken I., Poesen J. Characteristics of sediment deposits formed by intense rainfall events in small catchments in the Belgian Loam Belt // Geomorphology. 2000. V. 32. P. 69–82. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00068-9](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00068-9)
 38. Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Korshunova N.N., Groisman P.Ya. Climate variations and changes in extreme climate events in Russia // Environ. Res. Lett. 2007V. 2. P. 045020. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/2/4/045020>
 39. Chizhikova N., Yermolaev O., Golosov V., Mukharamova S., Saveliev A. Changes in the Regime of Erosive Precipitation on the European Part of Russia for the Period 1966–2020 // Geosciences. 2022. V. 12(7). P. 279. <https://doi.org/10.3390/geosciences12070279>
 40. Contractor S, Donat M.G, Alexander L.V. Changes in observed daily precipitation over global land areas since 1950 // J. Climate. 2021. V. 34(1). P. 3–19. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0965.1>
 41. Evans R. Factors controlling soil erosion and runoff and their impacts in the upper Wissey catchment, Norfolk, England: a ten-year monitoring programme // Earth Surface Processes and Landforms. 2017. V. 42(14). P. 2266–2279. <https://doi.org/10.1002/esp.4182>
 42. Fiener P., Wilken F., Aldana-Jague E., Deumlich D., Gómez J.A., Guzmán G., Hardy R.A., Quinton J.N., Sommer M., Van Oost K., Wexler R. Uncertainties in assessing tillage erosion – how appropriate are our measuring techniques? // Geomorphology. 2018. V. 304. P. 214–225. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.12.031>
 43. Fischer E.M., Knutti R. Observed heavy precipitation increase confirms theory and early models // Nature Climate Change. 2016. V. 6(11). P. 986–991. <https://doi.org/10.1038/nclimate3110>
 44. García-Ruiz J.M., Beguería S., Nadal-Romero E., González-Hidalgo J.C., Lana-Renault N., Sanjuán Y. A meta-analysis of soil erosion rates across the world // Geomorphology. 2015. V. 239. P. 160–173. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.008>
 45. Golosov V.N., Collins A.L., Dobrovolskaya N.G., Bazhenova O.I., Ryzhov Yu V., Sidorchuk A.Yu. Soil loss on the arable lands of the forest-steppe and steppe zones of European Russia and Siberia during the period of intensive agriculture // Geoderma. 2021. V. 381. P. 114678. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114678>
 46. Golosov V., Koiter A., Ivanov M., Maltsev K., Gusev A., Sharifullin A., Radchenko I. Assessment of soil erosion rate trends in two agricultural regions of European Russia for the last 60 years // J. Soils Sediments. 2018. V. 18. P. 3388–3403. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2032-1>
 47. Golosov V.N., Walling D.E., Konoplev A.V., Ivanov M.M., Sharifullin A.G. Application of bomb- and Chernobyl-derived radiocaesium for reconstructing changes in erosion rates and sediment fluxes from croplands in areas of European Russia with different levels of Chernobyl fallout // J. Environ. Radioact. 2018. V. 186. P. 78–89. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.06.022>
 48. Golosov V., Yermolaev O., Litvin L., Chizhikova N., Kiryukhina Z., Safina G. Influence of climate and land use changes on recent trends of soil erosion rates within the Russian Plain // Land Degradation and Development 2018. V. 29(8). P. 2658–2667. <https://doi.org/10.1002/ldr.3061>
 49. Hoffmann T.O., Baulig Y., Vollmer S., Blöthe J.H., Auerwald K., Fiener P. Pristine levels of suspended sediment in large German river channels during the Anthropocene? // Earth Surface Dynamycs. V. 11(2). P. 287–303. <https://doi.org/10.5194/esurf-11-287-2023, 2023>

50. *Malinowski R., Heckrath G., Rybicki M., Eltner A.* Mapping rill soil erosion in agricultural fields with UAV-borne remote sensing data // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2022. V. 48(3). P. 1–17. <https://doi.org/10.1002/esp.5505>
51. *Maltsev K., Yermolaev O.* Assessment of soil loss by water erosion in small river basins in Russia // *Catena*. 2020. V. 195. P. 104726. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104726>
52. *Panagos P., Borrelli P., Meusburger K., Yu B., Klik A., Lim K.J., et al.* Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records // *Sci. Rep.* 2017. V. 7(1). P. 4175. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04282-8>
53. *Prasuhn V.* Twenty years of soil erosion on-farm measurement: annual variation, spatial distribution and the impact of conservation programmes for soil loss rates in Switzerland // *Earth Surf. Process. Landf.* 2020. V. 45(7). P. 1539–1554. <https://doi.org/10.1002/esp.4829>
54. *Prasuhn V.* Experience with the assessment of the USLE cover-management factor for arable land compared with long-term measured soil loss in the Swiss Plateau // *Soil Till. Res.* 2022. V. 215. P. 105199. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105199>
55. *Renard K., Foster G., Weesies G., McDool D., and Yoder D.* Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *Agricultural Handbook* 1997. 703 p.
56. *Rodzik J., Furtak T., Zgłobicki W.* The impact of snowmelt and heavy rainfall runoff on erosion rates in a gully system, Lublin Upland, Poland // *Earth Surf Process Landf.* 2009. V. 34(14). P. 1938–1950. <https://doi.org/10.1002/esp.1882>
57. *Smetanova A., Verstraeten G., Notebaert B., Dotterweich M., L'etal A.* Landform transformation and long-term sediment budget for a Chernozem-dominated lowland agricultural catchment // *Catena*. 2017. V. 157. P. 24–34. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.05.007>
58. *Smolska E.* Extreme rainfalls and their impact on slopes-evaluation based on soil erosion measurements (as exemplified by the Suwalki Lakeland, Poland) // *Geogr. Pol.* 2007. V. 80. P. 151–163.
59. *Steinhoff-Knopp B., Burkhard B.* Mapping control of erosion rates: comparing model and monitoring data for croplands in northern Germany // *One Ecosystem* 2018. V. 3. P. e26382. <https://doi.org/10.3897/oneeco.3.e26382>
60. *Thaler E.A., Larsen, I.J., Yu Q.* The extent of soil loss across the US Corn Belt // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2021. V. 118. P. e1922375118. <https://doi.org/10.1073/pnas.1922375118>
61. *Van Oost K., Govers G. and Desmet P.* Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage // *Landscape Ecology*. 2000. V. 15. P. 577–589. <https://doi.org/10.1023/A:1008198215674/>
62. *Van Oost K., Govers G., de Alba S., Quine T.A.* Tillage erosion: a review of controlling factors and implications for soil quality // *Progress in Physical Geography*. 2006. V. 30(4). P. 443–466. <https://doi.org/10.1191/0309133306pp487ra>
63. *Van Rompay A., Verstraeten G., Van Oost K., Govers G., Poesen J.* Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2001. V. 26(11). P. 1221–1236. <https://doi.org/10.1002/esp.275>
64. *Walling D.E., Russell M.A., Hodgkinson R.A., Zang Y.* Establishing sediment budgets for two small lowland agricultural catchments in the UK // *Catena*. 2002. V. 47(4). P. 323–353. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(01\)00187-4](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00187-4)
65. *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. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116322>
66. <https://rp5.ru>
67. <https://57.rosstat.gov.ru/>
68. https://istmat.org/files/uploads/63059/statisticheskiy_ezhegodnik_2017_orlovskaya_oblast_2011-2016_orlovskoy_oblasti_80_let.pdf

Spatio-Temporal Changes in Erosion-Accumulation Processes on a Small Watershed in the Northern Part of the Central Russian Upland

V. N. Golosov^{1,2}, E. N. Shamshurina^{1,2,*}, G. I. Kolos², A. I. Petel'ko³, and A. P. Zhidkin²

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119199 Russia

²Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, 119017 Russia

³Novosil'skaya ZAGFES – branch of FSC of agroecology RAS, Mtsensk, 303035 Russia

*e-mail: shamshyr@mail.ru

First time comprehensive studies of soil erosion were carried out in a 42-hectare catchment area (near the Lomovets, Orel region) in the zone of Luvic Phaeozems with erosion resistance is significantly lower than that of Chernozems. Analysis of archival and historical cartographic materials showed that the duration of plowing of the catchment is 200 ± 10 years. The rates of soil erosion and accumulation over the entire plowing period, post Chernobyl period, last 50 ± 25 years and single erosion event (which occurred on May 31, 2022) were determined based on the use of field methods (soil-morphological, radiocesium, rain rills method, detailed survey using drone) and WaTEM/SEDEM erosion model calculation. The estimates of soil losses and accumulation indicate significant fluctuations in the rates of erosion-accumulative processes over the past 200 years, which are mainly due to the conditions of the formation of melt runoff, the repeatability and distribution of runoff-forming heavy rain within the warm season, the set of crops sown, the frequency and methods of tillage, changes in field boundaries. The average annual estimates of soil erosion for the agricultural period are higher than those for the post-Chernobyl period, since the rates of soil erosion have decreased in the last three decades. Estimates of soil losses using the WaTEM/SEDEM model are generally comparable with the results of determining soil losses based on the soil-morphological method, provided that the redistribution of sediment to the lower boundaries of arable land is taken into account. The spatial structure of a single erosive event turned out to be largely close to the spatial structure of the location of the areas of eroded and aggradational soils formed during the entire agricultural period.

Keywords: Luvic Greyzemic Phaeozems, water erosion, sediment redistribution, WaTEM/SEDEM, soil-morphological method, radiocesium method, UAV survey