

ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ
И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 631.4

ПОЛЕВАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ ЭРОЗИОННЫХ МОДЕЛЕЙ
НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЙ МАЛОГО ВОДОСБОРА
В БАССЕЙНЕ р. ВОРОБЖИ (КУРСКАЯ ОБЛАСТЬ)¹

© 2022 г. В. Н. Голосов^{a, b, c}, А. П. Жидкин^{d, *}, А. И. Петелько^e, М. С. Осипова^d,
Н. Н. Иванова^a, М. М. Иванов^{a, b}

^aМГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119999 Россия

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

^cКазанский федеральный университет, Университетская, 18, Казань, 420008 Россия

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

^eНовосильская зональная агролесомелиоративная опытная станция,
филиал Федерального научного центра Агрэкологии РАН, Семашко, 2А, Миценск, 303035 Россия

*e-mail: gidkin@mail.ru

Поступила в редакцию 15.05.2022 г.

После доработки 13.06.2022 г.

Принята к публикации 14.06.2022 г.

По результатам полевых оценок темпов смыва и аккумуляции на распаханном балочном водосборе Спокоевка, расположенном в бассейне р. Воробжи (Среднерусская возвышенность, лесостепная зона) проведена верификация расчетов перераспределения наносов, выполненных на основе совместного использования модели WATEM/SEDEM для расчетов ливневого смыва и модифицированной модели ГГИ – для талого смыва. Данные о слое смыва/намыва почвы (преимущественно чернозема) на распаханых склонах и в днище (стратоземы) балки за весь период земледельческого использования водосбора получены при помощи почвенно-морфологического метода. Скорость осадконакопления в днище балки за период после 1986 г. определялась по вертикальному распределению в отложениях изотопа ¹³⁷Cs чернобыльского происхождения. Сопоставление результатов моделирования с полевыми оценками потерь почвы на пашне и объемами отложений в днище балки показало их хорошую сходимость. Установлено, что, помимо точности среднесуточных оценок потерь почвы, модель удовлетворительно отражает пространственное расположение зон с разной интенсивностью смыва, а также учитывает перемещение почвенного вещества при механической эрозии. Некоторые расхождения результатов моделирования и полевых данных преимущественно обусловлены недостаточной детальностью входных параметров, например данных о севооборотах или особенностях микрорельефа территории. Выявлена недостаточная точность оценок по модели WATEM/SEDEM темпов и объемов аккумуляции наносов, особенно за пределами пашни.

Ключевые слова: водная эрозия почв, механическая эрозия, WATEM/SEDEM, аккумуляция, нанос, чернозем, стратозем

DOI: 10.31857/S0032180X22100045

ВВЕДЕНИЕ

Отличительной особенностью пахотных почв является высокая пространственная вариабельность их свойств, обусловленная совместным влиянием природных факторов почвообразования и антропогенных изменений, связанных с механическим перешиванием и перемещением пахотного слоя, переуплотнением, водной и ветровой эрозией, а в отдельных регионах и засолением почв [10, 36]. Сельскохозяйственные регио-

ны, в пределах которых именно водная эрозия почв играет доминирующую роль в снижении их плодородия, преобладают как в России [12–14, 31], так и в целом на суше [25]. Это обусловлено тем, что для выращивания сельскохозяйственных культур необходима вода, что предполагает либо выпадение достаточного количества осадков из атмосферы, либо при дефиците последних – ирригацию земель. Если в случае орошения эрозия почв может контролироваться человеком за счет точного расчета объемов поливных вод, то эрозия почв, вызванная выпадением атмосферных осадков и формированием поверхностного стока, отличается высокой пространственно-временной

¹ К статье имеются дополнительные материалы, доступные для авторизованных пользователей по doi: 10.31857/S0032180X22100045.

неравномерностью [4, 44]. Это связано как с особенностями выпадения дождевых осадков и таяния снега, так и с изменениями во времени контуров полей и набора высеваемых культур [26]. В этой связи только при использовании современных математических моделей, учитывающих процессы эрозии и переотложения наносов на склонах, а также влияние механической обработки на перемещение почв, можно оценивать деградацию почвенного покрова за разные интервалы времени и в разных частях конкретного поля или групп полей [23, 41].

На данный момент существует обширный набор эрозионных моделей, применение которых для количественной оценки темпов эрозионных процессов за фиксированный интервал времени на пахотных землях в мелком и среднем масштабах позволяет получать адекватные результаты [22, 26, 33, 41]. Точность оценок интенсивности эрозии и аккумуляции при их использовании в значительной степени определяется точностью входных параметров, некоторые из которых (эрозионный индекс осадков, почвозащитные коэффициенты культур, используемых в севооборотах) отличаются высокой пространственно-временной вариабельностью, что неизбежно сказывается на достоверности расчетов. Среди других наиболее успешно применяется модель WATEM/SEDEM [49, 50], так как она включает блоки расчета ливневой и механической эрозии, что позволяет оценивать темпы перераспределения почвенного вещества по всей площади исследуемого водосбора [22]. Данная модель используется для расчетов в различных масштабах, в том числе для оценки эрозионно-аккумулятивных процессов на малых водосборах [21, 47, 49, 52]. Несмотря на то, что модель WATEM/SEDEM широко используется во многих странах [22], для агроландшафтных условий Восточно-Европейской равнины она верифицируется на основе детальных полевых данных впервые.

Для поддержания и сохранения плодородия почв в пределах конкретных сельскохозяйственных угодий требуется проведение количественных оценок интенсивности смыва почв и переотложения наносов, выполненных в крупном масштабе. Только в этом случае возникает возможность идентифицировать участки наиболее значительного снижения плодородия почв за счет проявления водной и механической эрозии и в дальнейшем дифференцированно в зависимости от интенсивности потерь почвы проводить почвозащитные мероприятия [7].

Цель работы – верификация оценок эрозии почв на пашне и перераспределения наносов на малом водосборе, полученных на основе совместного использования модели WATEM/SEDEM и модели талого смыва Государственного гидрологического института (ГГИ) в модификации Лари-

онова с соавт. [9] на основе результатов детальных полевых исследований.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования. Регион исследования характеризуется высокой степенью сельскохозяйственной освоенности. В настоящее время распадается 82% территории бассейна р. Воробжи, где был выбран объект для детального изучения. Наиболее распространены следующие сельскохозяйственные культуры: кукуруза, яровой ячмень, однолетние травы, пшеница, сахарная свекла, горох, соя, многолетние травы. Часть земель занята парами. Земледельческое освоение данного региона началось в середине XVIII в. Максимальных значений площадь пашни достигла к 1930-м гг., с тех пор площадь пашни изменялась слабо. В последнее десятилетие отмечается небольшое локальное увеличение площади обрабатываемых земель, связанное с запахиванием нижних частей склонов и фрагментарно днищ балок. Согласно анализу космических снимков с 1970-х гг., на исследованном малом водосборе граница пашни в последние десятилетия не менялась.

В качестве объекта исследования выбран водосбор Спокоевка, расположенный в центре Курской области в пределах бассейна р. Воробжи, левобережного притока р. Сейм в пределах юго-западного склона центра Среднерусской возвышенности. Рельеф водосбора представлен возвышенной слабо-волнистой равниной с абсолютными высотами от 173.5 до 234.7 м, общим уклоном на юг. Общая площадь водосбора составляет 105.5 га, из которых 95 га (90%) заняты пашней.

Климат территории умеренно континентальный с умеренно холодной зимой и теплым летом. Самый холодный месяц – январь (-6.4°C), самый теплый – июль ($+20.8^{\circ}\text{C}$). Среднегодовая температура воздуха составляет $+8.9^{\circ}\text{C}$. Среднегодовое количество осадков варьирует по годам в пределах 426–895 мм [18]. Число дней со снежным покровом изменяется в интервале от 100 до 125 с декабря по март, а запас воды в снежном покрове – от 50 до 100 мм. Однако в последние десятилетия участились зимние оттепели, которые в отдельные годы способствуют периодическому сходу снежного покрова в зимние месяцы. На пашне в период снеготаяния и при выпадении ливневых осадков периодически возникает поверхностный сток, который приводит к формированию талого и ливневой смыва соответственно.

На склонах междуречий почвенный покров представлен пятнистостями черноземов типичных, выщелоченных и типичных карбонатных с участием луговато-черноземных почв в днищах водосборных понижений [34, 39] (Naplic and Luvic Chernozems (Loamic, Aric, Pachic). В связи с

развитием эрозионно-аккумулятивных процессов средние и нижние части распахиваемых склонов характеризуются наличием слабо- и средне-смывных черноземов, а также намывных и смыто-намывных почв в днищах небольших распахиваемых ложбин и по нижней границе пашни. В целом для территории исследования характерна умеренная степень эрозионной деградации почв на склоновых землях, связанная с мощным и сверхмощным гумусовым горизонтом почв и относительно непродолжительным по сравнению с территориями, расположенными севернее, периодом распашки и, как следствие, развития ускоренной эрозии почв [6].

Методика исследования. Методы математического моделирования эрозионно-аккумулятивных процессов. Оценку темпов перераспределения наносов в пределах малого распаханного водосбора “Спокоевка” осуществляли на основе использования трех независимых друг от друга методов: расчетов по моделям WATEM/SEDEM и модифицированной версии модели ГГИ, почвенно-морфологического и радиоцезиевого. Радиоцезиевый метод применяли для оценки объемов переотложения наносов, смытых с обрабатываемой части водосбора в днище балки. Известно, что в днищах балок без вторичных врезов переоткладывается 60–95% от общего объема поступающих в них с пашни наносов [3, 4]. Поэтому объемы накопления смытого материала в днище могут быть использованы для оценки достоверности расчетных данных по определению перераспределения наносов в пределах малых пахотных водосборов.

Модель WATEM/SEDEM позволяет оценивать перераспределение наносов в системе склон–склоновый водосбор–малый водосбор–водосбор реки, выявлять участки с максимальным смывом в пределах пашни и оценивать долю наносов, транспортируемую временными потоками с распаханых междуречий в постоянные водотоки [50]. Алгоритм расчета эрозии в модели WATEM/SEDEM основан на RUSLE. В нем используются аналогичные входные параметры, учитывающие особенности рельефа, климата, почвенного покрова, характера обработки почвы и состава севооборотов. Помимо смыва почв данная модель позволяет рассчитать темпы переотложения наносов, как в пределах пашни, так и на нераспахиваемых бортах и в днище балки, а также оценивать механическую эрозию (tillage erosion). В связи с этим цифровое моделирование эрозионно-аккумулятивных процессов проводили с учетом землепользования. Территория водосбора была разделена на распахиваемую часть и залуженную, а также было учтено расположение лесополос и грунтовых дорог (рис. 1). Ряд параметров, входящих в модель, а именно эрозионный индекс осадков и почвозащитный коэффициент высеваемых на пашне сельскохозяйственных культур,

изменяется во времени. Это связано с изменениями в режиме выпадения и слое осадков, а также с периодической сменой севооборотов. Расчет проводили в программе WATEM/SEDEM версии 2004 г. [45]. R-фактор (эрозионный индекс дождевых осадков) принят равным 0.029 МДж мм/(м² ч год) согласно глобальной базе данных Global Rainfall Erosivity [40]. Он характеризует осредненное за период 60 лет значение фактора. Следует отметить, что в последние три десятилетия при общем очень слабом тренде увеличения слоя осадков теплого времени года, статистических различий между слоем осадков, выпадавших в период 1963–1986 и 1986–2015 гг. не выявлено [31]. K-фактор (эродируемость почв) принят равным 35 кг ч/(МДж мм), согласно расчетам по аналитическим данным свойств почв [6]. C-фактор (почвозащитная роль возделываемых культур относительно чистого пара) задан в среднем 0.43 согласно описанному выше долевого участию культур в составе севооборотов и агроэрозионному индексу (stor erosivity) каждой из культур в данной зоне по Ларионову [8]. Сложность учета C-фактора связана с отсутствием точной информации о ежегодном составе севооборотов и характере обработки почвы в прошлом. Среднемноголетний C-фактор в данном регионе за период распашки варьировал в диапазоне 0.35–0.5. Как следствие, разброс в расчетах темпов эрозионно-аккумулятивных процессов из-за вариабельности данного показателя составил не более 15–17%. В целом полученный коэффициент соответствует оценке регионального C-фактора по [19]. LS-фактор рассчитывали в программе WATEM/SEDEM автоматически по заданным по умолчанию параметрам на основе цифровой модели рельефа ALOS (AW3D30) с разрешением в 1 угловую секунду в равнопромежуточной цилиндрической проекции (EPSG:4326) в системе координат WGS 84.

Талый смыв для исследуемого водосбора рассчитывали по модели ГГИ в модификации Ларионова с соавт. [9, 15]. При расчете учитывали следующие входные параметры: слой поверхностного склонового стока, принятый равным 95 мм, согласно [15]; эродируемость почвы, рассчитанная на основе тех же аналитических параметров, что и эродируемость почв для ливневого смыва, но согласно методике [15]; длина склона и крутизна склона, рассчитанные для каждого пикселя на основе цифровой модели рельефа. Расчет талого смыва проводили в программе MapInfo, в которой составляли таблицу со значениями перечисленных параметров для каждого пикселя размером 20 × 20 м, затем с помощью встроенной подпрограммы, написанной С.Ф. Красновым, проводили автоматизированный расчет значений потенциального талого смыва. Полученную таблицу конвертировали в точечный файл и растры талого смыва.

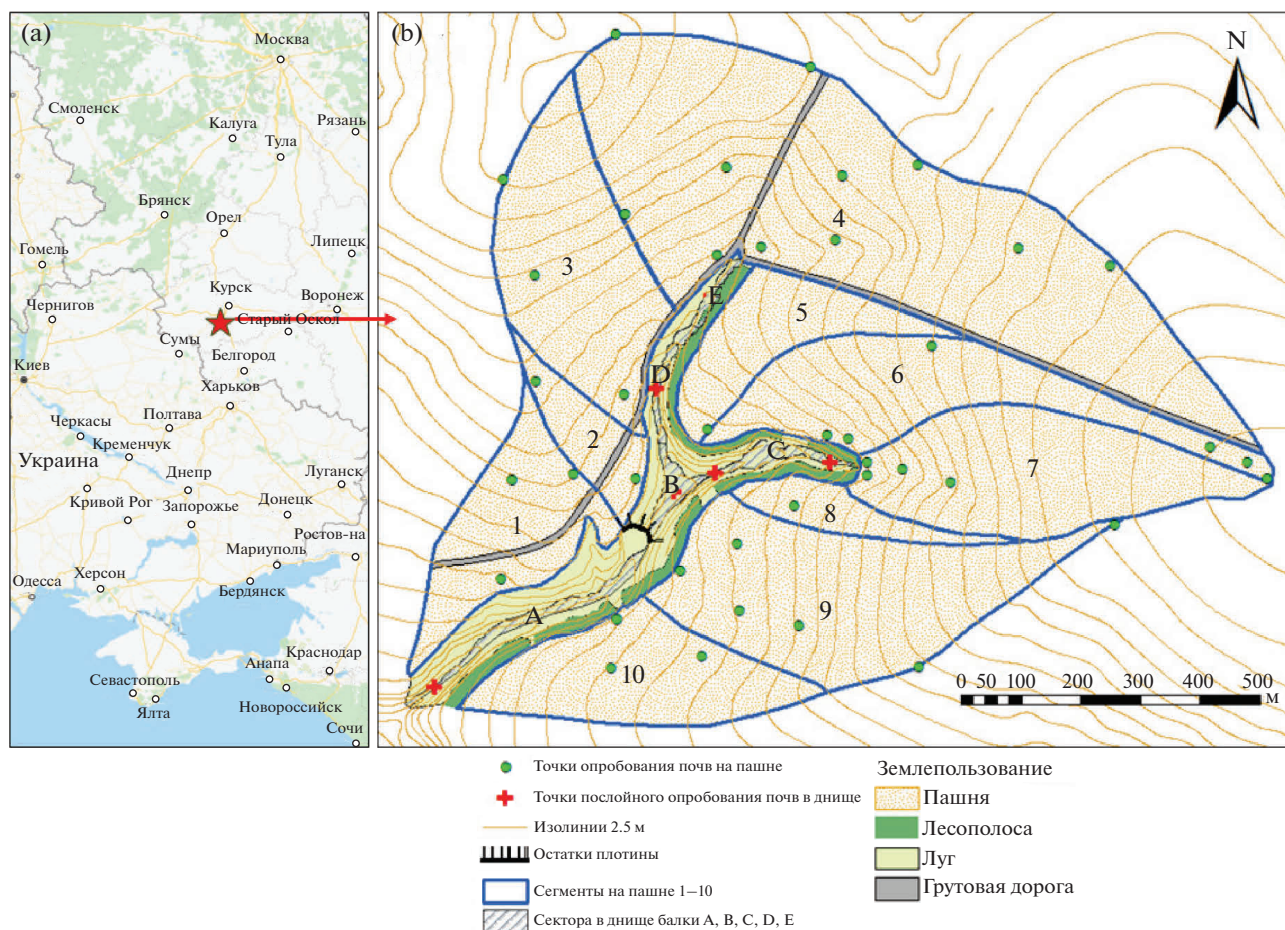


Рис. 1. Местоположение объекта исследования (а); рельеф, землепользование, расположение точек опробования почв и выделенные в пределах водосбора сегменты на склонах и сектора в днище балки (б).

Методы полевой оценки аккумуляции наносов в днище балки. На начальном этапе были зафиксированы специфические морфологические особенности бортов и днища балки, необходимые для корректного учета объема наносов и путей доставки наносов со склонов в днище. По левому борту балки это лесополоса шириной 20–25 м, созданная в 1970-е гг., в которой, вероятно, перетлагается часть наносов, смываемых с пашни. По правому борту балки лесополоса, созданная в те же годы, сохранилась только фрагментарно в основном в приустьевой части, шириной в один древесный ряд. В центральной части днища балки ниже по течению от слияния двух отвершков в середине 1970-х гг. была сооружена земляная плотина, которая была быстро прорвана, но сохранившаяся ее часть до сих пор создает подпор при формировании стока воды в днище. Это способствует переотложению значительной части наносов, транспортируемых по днищу балки выше плотины. Участок днища балки, расположенный ниже по течению от плотины, имеет больший уклон и поэтому характеризуется преимущественно транзитом наносов при их частичном

переотложении. Еще одна земляная прорванная плотина находится в средней части восточного притока. Она оказывает аналогичный эффект на транспорт наносов в этом притоке.

Далее днище и борта балки по особенностям их морфологии были разделены на 5 секторов (сектора А, В, С, D, E, рис. 1). Каждый сектор характеризуется относительно однородными условиями переотложения наносов в днище и имеет свои особенности в путях доставки наносов с пашни. Сегмент А характеризует участок бортов и днища балки от устья балки до разрушенной земляной плотины. Сегмент В характеризует участок бортов и днища балки от плотины до разветвления днища на два отвершка. Сегмент С характеризует левый отвершек балки. Сегменты D и E характеризуют правый отвершек балки. Граница между сегментами D и E проведена в связи с особенностями морфологии правого борта балки. На участке E борт балки пологий и распашка проводится почти до днища, что способствует непосредственному поступлению наносов с пашни в днище балки. На участке D между пашней и дни-

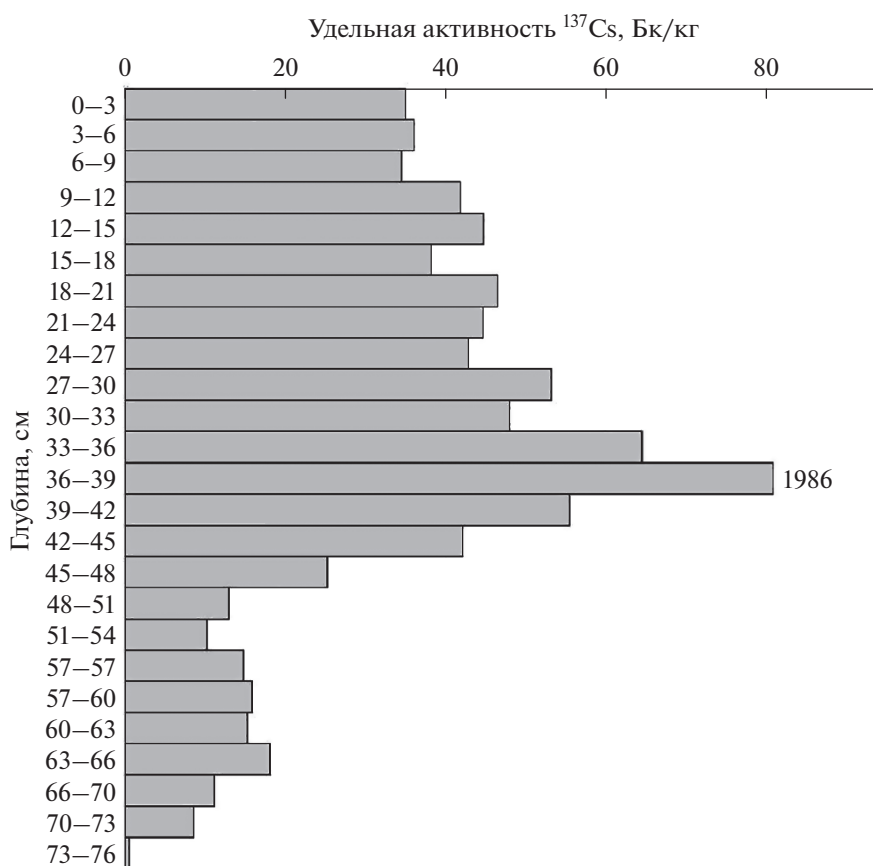


Рис. 2. Вертикальное распределение ^{137}Cs в разрезе S-1. 1986 — поверхность почвы в 1986 г.

шем находится залуженный борт балки, на котором, несомненно, частично аккумулируются наносы. В днище балки было заложено 6 почвенных разрезов таким образом, чтобы охарактеризовать каждый сектор днища с однородной морфологией.

Оценку объемов аккумуляции наносов в днище балки выполняли на основе использования радиоцезиевого и почвенно-морфологического методов, то есть за два интервала времени: 1) за период с 1986 г. (чернобыльские выпадения ^{137}Cs); 2) за весь период распашки территории, продолжительность которой была определена на основе анализа архивных источников в 250 лет. Для определения содержания ^{137}Cs из передней стенки каждого из разрезов послойно проведен отбор образцов почв с площади 15×15 см через 3 см для верхних 60 см и ниже по разрезу через 5 см. Образцы почв высушивали, растирали и просеивали через сито 2 мм. Гамма-спектрометрический анализ проб почвы проводили в научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов географического факультета МГУ 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 ^{137}Cs на линии 661.66 кэВ.

По результатам проведения анализов содержания ^{137}Cs в послойно отобранных образцах почв построены эпюры вертикального распределения изотопа, на которых отчетливо выделялся пик 1986 г., датирующий положение днища балки на момент выпадения ^{137}Cs в мае 1986 г. после аварии на ЧАЭС (рис. 2). Таким образом, толща отложений, располагающаяся выше данного пика, накопилась за период с 1986 до 2020 гг., когда проводился отбор образцов. Детально методика использования радиоцезиевого метода для датировки отложений в днищах балок рассмотрена ранее [29, 30].

В разрезах проведено описание морфологических свойств почв. Так как в разрезах не вскрывалась вся аккумулятивная толща, для определения мощности отложений смытого с пашни материала за весь период земледельческого освоения в днище каждого из разрезов проводили бурение с описанием вскрываемой толщи почвы. Границу между стратоземом и погребенной почвой определяли по морфологическим признакам: отсутствию характерной для стратоземов слоистости, структуре и цвету [28].

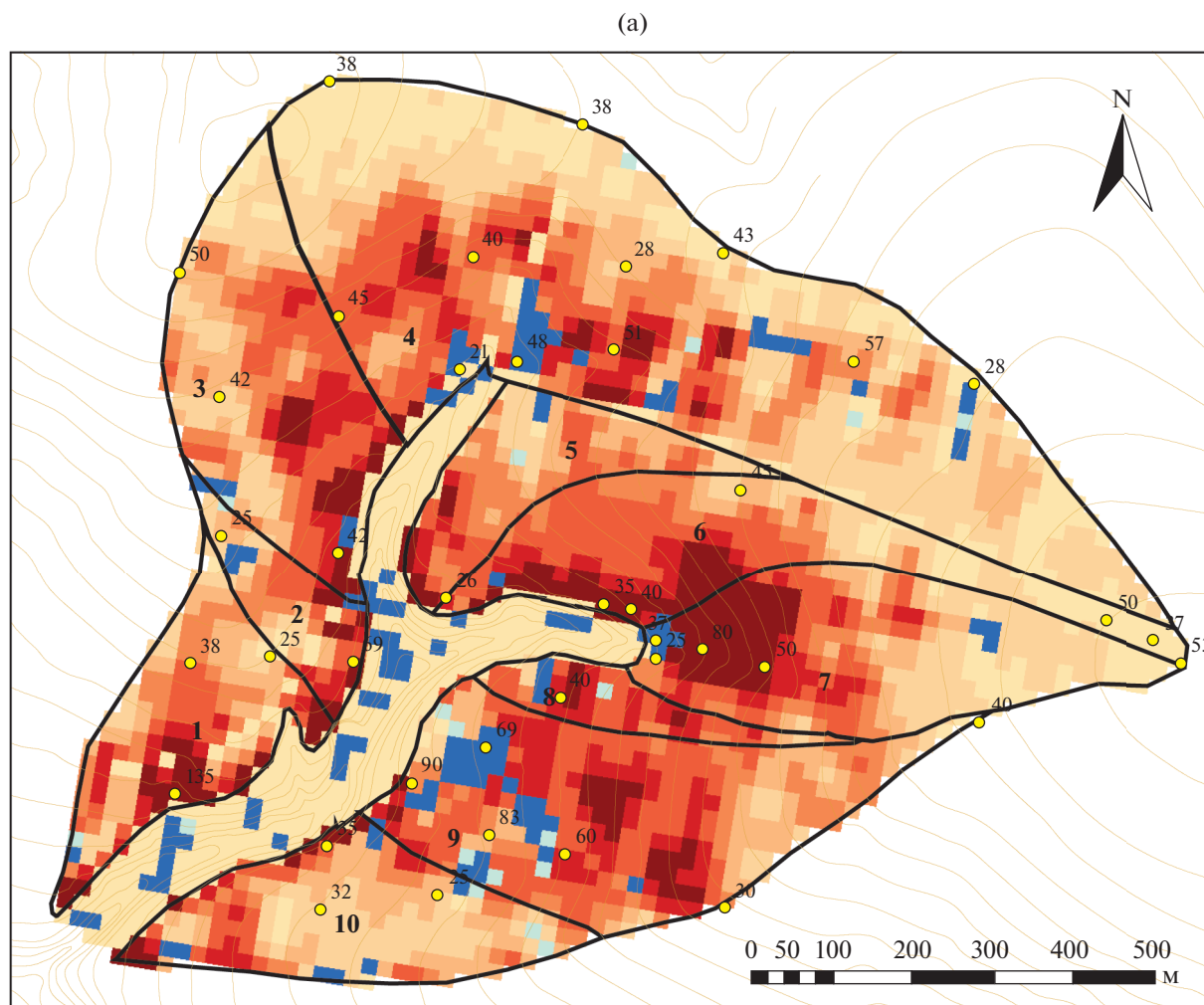


Рис. 3. Темпы ливневой (а), механической эрозии почв (б) и аккумуляции наносов, рассчитанные по WATEM/SEDEM.

Для определения площади днища при помощи GPS-съемки были установлены и нанесены на карту границы тылового шва днища.

Так как на всем своем протяжении днище балки, включая два отвершка, достаточно плоское, для расчета среднегодовой аккумуляции ($A_{ур}$, т/год) использовали формулу:

$$A_{ур} = (S_a h_a p_a + \dots + S_n h_n p_n) / T, \quad (1)$$

где S_a – площадь сектора днища балки А, м²; h_a – мощность отложений наносов в точке отбора, м, сегмент А; p – плотность почвы, г/см³; T – время, год. Плотность почвы (1.3 г/см³) принимали условно одинаковой для всей толщи наносов. Данная величина соответствует средней плотности стратоземов, полученной при послойной отборе почв для проведения радиоцезиевого анализа.

Методы полевой оценки эрозионно-аккумулятивных процессов на пашне. Пахотная часть водосбора была разделена на склоновые водосборы и разделяющие их участки склонов на основе мор-

фодинамического анализа рельефа. В общей сложности выделено 10 сегментов. Границы между отдельными участками проведены по местным водоразделам, определяющим направление стока воды и наносов. Граница между сегментами 4, 5, 6 проведена по грунтовой дороге, проходящей преимущественно по гребню склона и, соответственно, разделяющей поверхностные потоки вещества почв. С учетом особенностей поступления наносов с пашни в днище балки, выделенные сегменты были объединены в 5 групп, исходя из различий в коэффициентах доставки [42]. В первую группу входят склоновые ложбинные водосборы (рис. 1, участки 4 и 7), наносы с которых поступают непосредственно в верховья отвершков и далее в днище балки. Во вторую группу входит часть склонов водосбора с серией слабо выраженных в рельефе потяжин (рис. 1, участок 3), которые отделяются от днища балки грунтовой дорогой и очень узкой полосой задернованного борта балки. Большая часть смытых с пашни наносов до-

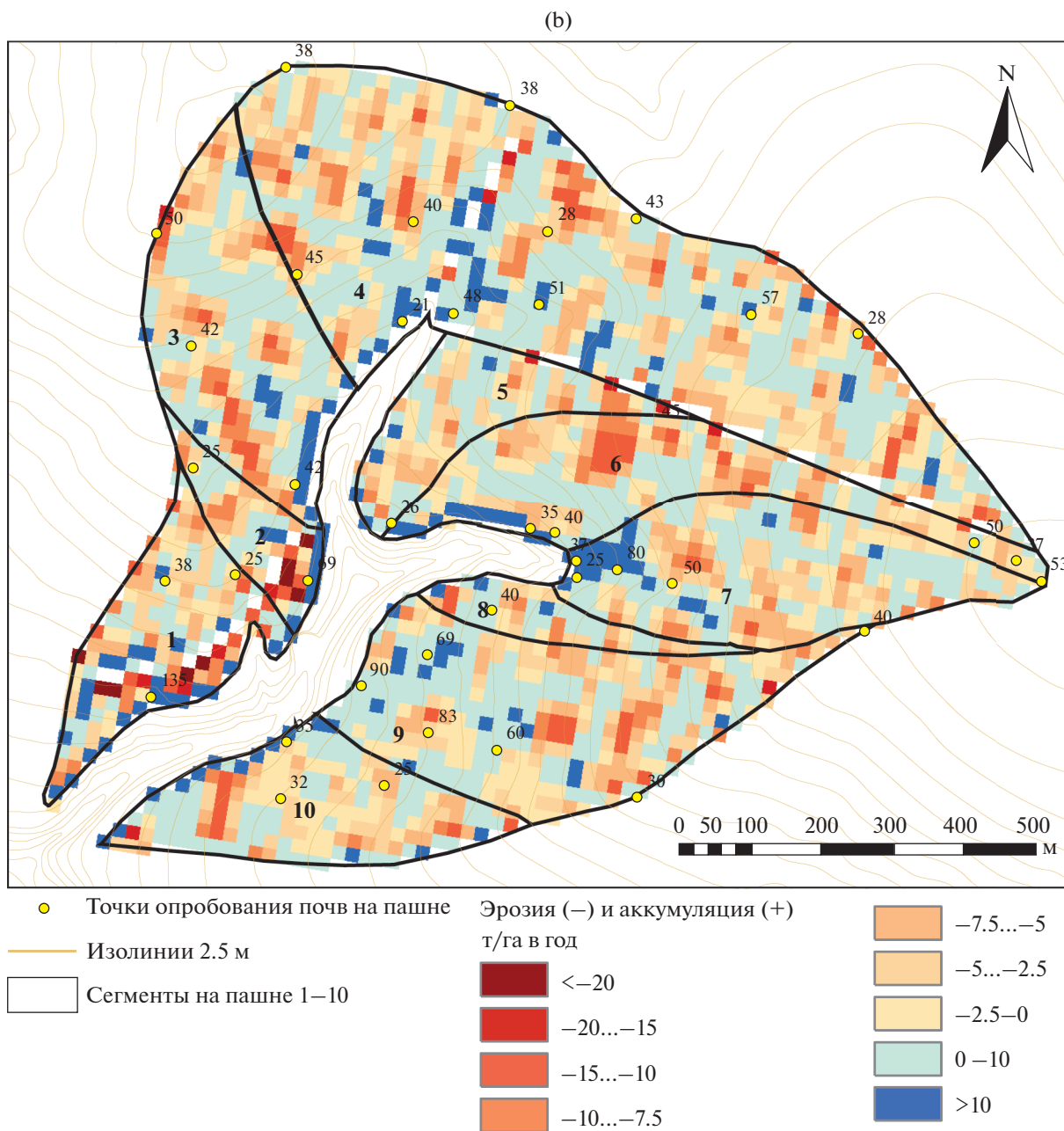


Рис. 3. Окончание

ставляется в днище балки, но небольшое количество переотлагается на ее борту. В третью группу включены участки рассеивающих склонов (рис. 3а, участки 5, 8 и 10), отделенные от днища балки двурядной лесополосой и задернованным бортом балки. Вероятность поступления в днище балки наносов, вынесенных за пределы пашни поверхностным стоком, на этом участке чрезвычайно низка, так как рассеивание стока способствует снижению энергии потоков, а лесополоса и задернованный борт задерживают большую часть поступающего материала. Наконец, участки 1 и 2,

а также 6 и 9 составляют группы 4 и 5 соответственно. Это склоны со слабо выраженными в рельефе ложбинами и потяжинами. От днища они отделены крутым задернованным склоном (участки 4 группы) и в дополнение двурядной лесополосой (участки 5 группы). По коэффициенту доставки наносов со склонов в днище долины они занимают промежуточное положение между участками второй и третьей групп. Здесь происходит концентрация стока, но по нижней границе пашни сформирована относительно высокая напашь, и протяженность задернованного борта

Таблица 1. Баланс наносов (т/год с участка), рассчитанный по эрозионным моделям

Параметр	Распахиваемая часть водосбора										
	сегмент										
	1	10	2	9	3	4	5	6	7	8	всего
Перераспределение наносов при формировании поверхностного стока воды											
Ливневой смыв	74	64	28	129	114	182	45	104	118	26	884
Ливневая аккумуляция	0	15	78	130	21	137	4	27	81	12	503
Талый смыв	5	2	2	10	7	11	2	9	10	2	60
Перераспределение почвенного вещества при обработке почвы сельскохозяйственной техникой (механическая эрозия)											
Эрозия	25	17	12	31	25	70	13	26	23	5	248
Аккумуляция	27	19	11	29	27	72	10	20	26	6	247
Вынос с пашни	78	51	-48	10	100	56	43	86	47	17	441
Нераспахиваемая часть (борта и днище балки)											
	сектор						всего				
	A	B	D	E	C						
Аккумуляция	99	71	34	8	93	306					
Весь водосбор											
Водная эрозия											945
Аккумуляция наносов, транспортируемых при водной эрозии											809
Вынос за пределы водосбора											136

балки между распаханным склоном и днищем достаточно велика. Следует отметить, что разделение пахотных склонов на сегменты является относительно условным, поскольку в отдельные годы возможно частичное поступление наносов в соседние сегменты в зависимости от направления распашки, характера обработки почвы и интенсивности эрозионного события. Тем не менее, такое разделение склонов представляется в целом правомерным для среднесрочных оценок.

На пашне, занимающей практически все склоны водосбора Спокоевка, заложили три опорных почвенных разреза и 40 буровых колонок глубиной до 1.5 м, относительно равномерно распределенных по площади пашни. Сделаны детальные описания разрезов с выделением почвенных горизонтов.

Расчет балансов наносов на основе почвенно-морфологического метода для каждого сегмента пашни проводили отдельно для двух вариантов: на основе анализа нижних границ горизонтов A1 и A1B относительно эталонных значений мощностей горизонтов чернозема типичного на приводораздельном участке в восточной части водосбора. Для корректности расчеты проводили как в среднем (со средними значениями эталонных горизонтов почв и длительности распашки) (табл. 1),

так и в диапазоне значений в связи с варьированием эталонных глубин горизонтов почв (A1 от 50 до 55 см, A1B от 77.5 до 82.5 см) и длительности распашки (от 225 до 275 лет). Суммарные объемы эрозии почв, то есть общего количества, мобилизованного процессами эрозии вещества, рассчитывали в среднем по сегменту на основе разницы между эталонной мощностью гумусовых горизонтов и арифметическим средним мощностей гумусовых горизонтов почв без проявлений признаков аккумуляции наносов. Суммарные объемы ежегодных эрозионных потерь, то есть объемы вещества, выносимого за пределы пашни, рассчитывали на основе разницы между эталонной мощностью гумусовых горизонтов и арифметическим средним мощностей гумусовых горизонтов в сегменте.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Оценка перераспределения почвенного вещества эрозионно-аккумулятивными процессами на основе математического моделирования. Результаты расчетов эрозии и аккумуляции на водосборе Спокоевка на основе эрозионных моделей со средним значением C-фактора, равным 0.43, представлены в табл. 1 и на рис. 3. Потенциальный диапазон

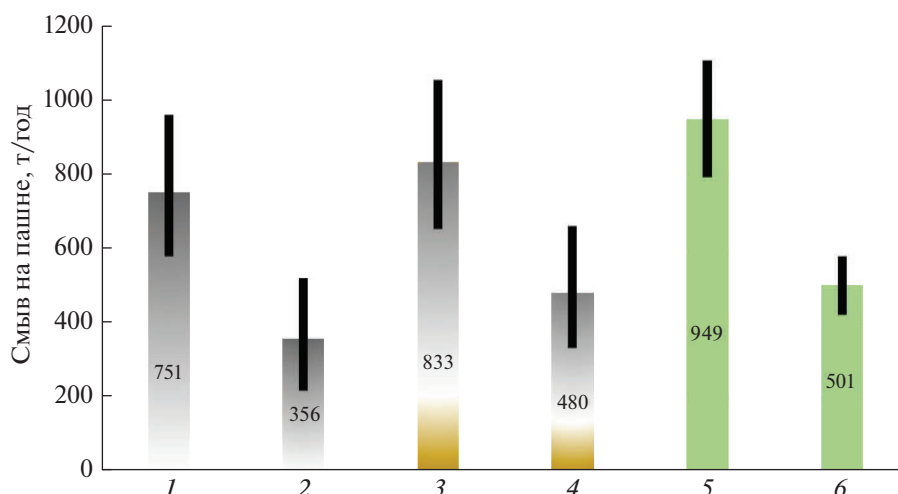


Рис. 4. Средние значения и диапазон варьирования темпов среднееголетнего смыва почв на пашне водосбора Споковка. 1 – суммарный смыв по почвенно-морфологическому методу (горизонт А1), 2 – вынос наносов с пашни по почвенно-морфологическому методу (горизонт А1), 3 – суммарный смыв по почвенно-морфологическому методу (горизонт А1В), 4 – вынос наносов с пашни по почвенно-морфологическому методу (горизонт А1В), 5 – суммарный смыв по цифровому моделированию, 6 – вынос наносов с пашни по результатам цифрового моделирования.

варьирования расчетных темпов эрозии почв в связи с возможным варьированием С-фактора в диапазоне 0.35–0.5 отображен на рис. 4.

Результаты моделирования свидетельствуют об относительно высоких темпах перераспределения почвенного вещества процессами водной и механической эрозии на исследуемом водосборе, которые в среднем составляют 10 т/га в год. Наиболее значительный смыв наблюдается на пашне выше левого отвешка.

Более половины перемещаемых наносов (около 500 т/год) переотлагается внутри пашни. Такая величина внутрисклоновой аккумуляции получена с учетом допущения, что все наносы, формирующиеся при талом стоке, выносятся за пределы водосбора. Данное допущение обусловлено тем, что модель талого смыва не позволяет рассчитывать темпы аккумуляции. Аккумуляция наносов в пределах пашни приурочена преимущественно к нижним и средним частям днищ ложбин, а также к нижним участкам склонов на границе пашни и задернованных бортов в верховьях отвешков. Таким образом, за пределы пашни ежегодно выносятся около 440 т/год почвенного вещества, перемещаемого водными потоками, что соответствует темпам эрозионных потерь около 4.6 т/га в год. Эрозионные потери с талым смывом составили 60 т/год, а с ливневым смывом 381 т/год, то есть на долю ливневого смыва приходится около 87% от суммарных эрозионных потерь.

Согласно расчетам по WATEM/SEDEM, значительные объемы почвенного вещества перемещаются локально на небольшие расстояния внутри пашни в результате механической эрозии (tillage erosion). При проходе сельскохозяйственной

техники происходит “перетаскивание” почвенного вещества в днища распаханых ложбин и к нижней границе пашни. Ежегодно в пределах водосбора таким образом перемещается внутри пашни около 250 т.

Почвенное вещество, выносимое водными потоками за пределы пашни, переотлагается на бортах и, преимущественно, в днище балки. Объем аккумуляции наносов в днище балки и на ее бортах, согласно расчетам по модели, составил около 300 т/год. Только около 14% от общего объема вынесенного с пашни вещества транспортируется за пределы водосбора в принимающую долину Верхней Воробжи.

Оценка перераспределения почвенного вещества эрозионно-аккумулятивными процессами на основе почвенно-морфологического и радиоцезиевого методов. Расчет объемов и темпов аккумуляции наносов в днище балки проводили по секторам (рис. 1, табл. 2). Мощности намывтой толщи за весь агрикультурный период составили в среднем около 220 см. В разных частях днища мощность наносов варьирует слабо от 190 до 220 см. Среднееголетние темпы аккумуляции наносов составили 223 т/год. Ежегодные объемы накопления наносов в днище балки за период 1986–2020 гг., полученные на основе использования ¹³⁷Cs в качестве хрономаркера, оказались очень близки к среднееголетним за весь агрикультурный период, установленным на основе почвенно-морфологического метода, и составили 194 т/год. Объемы аккумуляции, выявленные каждым из полевых методов, примерно в 1.6 раз меньше величины, полученной при расчетах по модели. Вероятно, это расхождение возникло за счет не-

Таблица 2. Среднемноголетние темпы аккумуляции в пределах выделенных сегментов в днище балки, рассчитанные независимыми методами, т/год

Сегмент	Площадь, м ²	Точка отбора	Радиоцезиевый метод		Почвенно-морфологический метод	
			мощность намытой толщи, см	аккумуляция в сегменте, т/год	мощность намытой толщи, см	аккумуляция в сегменте, т/год
A	6628	S6	20	49	220	76
B	4547	S2	18	31	225	53
C	4232	S3, S4	30	49	213	47
D	2618	S1	39	39	200	27
E	2017	S5	33	25	190	20
Всего в днище				194		223

учтенного переотложения части наносов в лесополосах и на задернованных бортах балки по пути транспортировки от края пашни до днища.

Оценку темпов эрозионно-аккумулятивных процессов на пашне на основе почвенно-морфологического метода проводили с учетом двух допущений, касающихся выбора эталона и оценки длительности периода распашки данной территории. В качестве эталона использовали мощности горизонтов почвы на приводораздельном участке в восточной части водосбора. Длительность распашки была принята в среднем равной 250 годам. В табл. 3 представлены средние значения балансов наносов с учетом указанных допущений. На рис. 4 показана экспертная оценка варьирования расчетных темпов эрозии почв с учетом допущения точности определения эталона ± 2.5 см и длительности распашки ± 25 лет.

Рассчитанные по почвенно-морфологическому методу темпы эрозии почв на пашне в среднем близки к расчетам по модели и составили около 751–833 т/год. Важно отметить, что использованный способ расчета темпов эрозии почв на основе почвенно-морфологического метода выполнен в соответствии с [16]. Однако такой способ расчета не учитывает интенсивность прироста гумусового горизонта, который в черноземах типичных составляет около 0.4 мм/год по данным [17]. Таким образом, вероятно, полученные темпы эрозии почв на основе почвенно-морфологического метода несколько занижены.

Отметим, что в действующих инструкциях по применению почвенно-морфологического метода [16] отсутствуют указания по учету объемов переотложения наносов внутри пашни. Тем не менее, на данном водосборе такой учет внутрисклоновой аккумуляции необходим, поскольку почти все распашиваемые ложбины заполнены наносами, которые обязательно должны быть учтены в балансе. Почвенно-морфологический метод позволяет лишь приблизительно оценить объемы переотложения наносов, в связи с особым характером

протекания почвообразовательных процессов в днищах ложбин и сложностью расчета площади контуров днищ. Тем не менее, согласно почвенно-морфологическому методу доля переотложения наносов внутри пашни – около 50%, что составляет 356–480 т/год.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные на основе расчетов по моделям WATEM/SEDEM и модифицированной модели ГГИ результаты для обрабатываемых склонов в целом сопоставимы с оценками перераспределения наносов, определенными на основе применения почвенно-морфологического метода. Установленная на основе моделирования величина потеря почвы в 4.6 т/га в год несколько ниже оценок среднегодового смыва почв на пашне в среднем для Курской области, полученного при мелкомасштабных оценках с использованием расчетов на основе модифицированного USLE [14], но сопоставима со слоем смыва за весь период земледельческого освоения для данного региона, определенного на основе данных по степени смывости почв [27]. Надо отметить, что и в региональных оценках смыва, и в целом для Курской области не учитывалось переотложение наносов внутри пашни.

Также некоторое завышение суммарных потерь связано с использованием для расчетов талого смыва модифицированной модели ГГИ. Данная модель разработана в 1970-е гг. на основе полевых наблюдений за формированием талого стока и смыва в период с преобладанием устойчиво низких температур воздуха в зимние месяцы, когда промерзание почвы было практически ежегодным. Поэтому глубина промерзания почвы не включена в качестве одного из параметров в модель. Фактически начиная с конца 1980-х гг. из-за потепления климата в Курской области и в целом на Среднерусской возвышенности участились зимние оттепели, а глубина промерзания почвы

Таблица 3. Баланс наносов, рассчитанный по почвенно-морфологическому (за 250 лет) и радиоцезиевому (за 34 года) методам, т/год

Параметр	Распахиваемая часть водосбора										
	сегмент										
	1	10	2	9	3	4	5	6	7	8	всего
Эрозия (ПММ А1*)	64	76	34	107	37	231	62	54	73	13	751
Эрозия (ПММ А1В**)	106	38	32	77	134	280	94	33	24	16	833
Вынос с пашни (ПММ А1)	–41	76	7	–58	37	185	62	54	22	13	356
Вынос с пашни (ПММ А1В)	15	38	32	–64	134	249	94	33	–66	16	480
	Нераспахиваемая часть (днище балки)										
	сектор										
	А		В		D	E	С			всего	
ПММ аккумуляция (250 лет)	76		53		27	20	47			223	
Радиоцезиевый аккумуляция (1986–2020 гг.)	49		31		39	25	49			194	
	Весь водосбор										
Эрозия***											792
Аккумуляция***											582
Вынос за пределы водосбора (без учета аккумуляции на задернованных бортах балки)***											210****

* Почвенно-морфологический метод (на основе оценок нижней границы горизонта А1).

** Почвенно-морфологический метод (на основе оценок нижней границы А1В).

*** Средние значения, полученные на основе указанных методов.

**** Без учета аккумуляции на задернованных подножиях склонов междуречий, в лесополосах и на задернованных бортах балки.

резко уменьшилась, что привело к сокращению талого стока со склонов [7]. В последнее десятилетие XX в. и начале XXI в., согласно данным полевых наблюдений, поверхностный сток на пашне отмечался только в отдельные годы, когда промерзание почвы превышало 40 см (табл. 4).

Помимо наблюдений за стоком на Новосильской станции, снижение талого смыва подтверждается данными гидрографов р. Сейм, в которых четко прослеживаются тенденции по уменьшению уровней половодья и увеличению расходов летней и зимней межени, что свидетельствует о росте вклада подземного стока в питание реки по сравнению с поверхностным и внутрипочвенным стоком [46]. Таким образом, фактически талый сток и смыв на исследуемом водосборе в период после 1986 г. наблюдался крайне редко, и расчетная величина потери почвы при талом стоке должна быть уменьшена при сопоставлении объемов выноса смытой почвы в днище балки с оценками по радиоцезиевому методу. Следует отметить, что в период 1960–1986 гг. сток воды со склонов и смыв почвы в период снеготаяния, со-

гласно данным мониторинговых наблюдений, формировались на Среднерусской возвышенности практически ежегодно [2]. С другой стороны, модель ГГИ не учитывает размыв днищ склоновых ложбин при формировании талого смыва. Между тем, согласно данным 16-летних наблюдений за талым стоком, среднегодовой смыв с ложбинных водосборов в 4.4 раза превышает сток со склонов [4]. Таким образом, при сопоставлении расчетных данных с оценками суммарных потерь почвенно-морфологическим методом за весь период распашки следует учитывать, что фактические потери при талом стоке могли быть выше.

Тем не менее основной объем смытого с водосбора материала формируется в период ливневого стока. При формировании поверхностного стока при выпадении ливней зоны смыва и аккумуляции чередуются от водораздела по направлению к подножию пахотного склона, так как достаточно быстро наступает насыщение склоновых потоков наносами и их переотложение [20]. Эта важная специфика эрозионно-аккумулятивного процесса в отличие от других эрозионных моделей

Таблица 4. Многолетние показатели стока талых вод и водопоглощение на зяби на Новосильской ЗАГЛОС (Орловская область)

Год	Сток, мм	Запас воды, мм		Глубина промерзания почвы, см	Продолжительность снеготаяния, сут	Осадки за период снеготаяния, мм	Коэффициент стока	Водопоглощение, мм
		в почве 0–50 см	в снеге					
1991	3.0	171.6	58	10	5	17.3	0.052	72.3
1992	0	169.4	54	17, местами	14	15.9	0	69.9
1993	9.0	139.5	40	45–83	10	22.2	0.225	53.2
1994	37.0	263.4	119	75	12	17.1	0.310	99.1
1995	0.3	228.0	107	25	21	10.4	0.002	117.1
1996	29.0	165.8	73	70–80	16	8.3	0.397	52.3
1997	1.1	227.3	56	38–53, местами	2	5.0	0.019	55.9
1998	0	188.0	48	18–20	18	11.9	0	59.9
1999	0	166.5	144	20–25, местами	11	7.1	0	151.1
2000	0.5	209.4	57	7–25	12	0	0.007	56.5
2001	0	198.0	81	2–5, местами	12	21.3	0	102.3
2002	0	183.8	81	8–10	10	40.4	0	121.4
2003	24.1	211.6	97	41–70	13	24.7	0.249	97.6
2004	0	189.5	58	10–18	6	14.3	0	72.3
2005	0	203.0	71	5–12	12	14.5	0	85.5
2006	0	211.7	109	0–3	5	21.0	0	130.0
2007	0	225.4	51	0	13	29.6	0	80.6
2008	0	208.0	67	20–31	8	14.0	0	81.0
2009	0	201.6	105	12–25	21	33.0	0	138.0
2010	0	261.9	89	30–40	15	22.0	0	111.0
2011	0	155.7	119	Талая	15	14.0	0	133.0
2012	0	168.0	61	18–40	18	25.2	0	86.2
2013	0	170.9	108	5–15, местами	12	18.0	0	126.0
2014	0	202.7	26	14–17, местами	15	14.0	0	40.0
2015	0	263.4	43	15–20	13	20.0	0	63.0
2016	0	235.2	54	1–5, местами	15	25.0	0	79.0
2017	0	211.9	80	10–21	15	15.0	0	95.0
2018	8.1	220.6	84	30–45	22	29.0	0.07	104.9
2019	0	141.6	99	15–35	20	18.0	0	117.0
2020	0	134.8	48	3–10	9	5.0	0	53.0

учтена в модели WATEM/SEDEM, что является ее несомненным достоинством. Другим важным достоинством модели является расчет механической эрозии, на долю которой, в частности в пределах исследуемого водосбора, приходится порядка 20% от общего объема перемещенного материала. На склонах с более расчлененным рельефом темпы механической эрозии могут превышать интенсивность смыва от водной эрозии. Так, на 20% от общей площади пашни в Европе темпы механической эрозии составляют более 5 т/га в год, что превышает среднемноголетние темпы смыва от склонового стока воды на пашне [48]. В Канаде в пределах распахиваемых холмистых моренных равнин темпы механической эрозии могут достигать 54 т/га в год, существенно превышая темпы водной эрозии [38]. И хотя механическая эрозия не приводит к выносу почвенного вещества за пределы обрабатываемых склонов, она может существенно сказываться на формировании участков смытых и намывных почв внутри пашни. В частности, показано, что именно благодаря механическому перемещению наносов при вспашке происходит заполнение днищ ложбин, в том числе после формирования в их днищах линейных эрозионных форм [24].

Следует отметить, что модель WATEM/SEDEM не лишена недостатков. В большей степени они обусловлены не столько алгоритмом модели, сколько возможностью получения достоверных и детальных материалов для некоторых входных параметров. Наиболее проблематично подобрать данные о фактических посевах на конкретно исследуемом водосборе, а также о времени выпадения в теплое время года стокоформирующих ливней. При среднемасштабных оценках темпов смыва с использованием модели WATEM/SEDEM данные сложности не имеют принципиального значения, так как в этих случаях основная цель исследования состоит в определении суммарных потерь почвы с пахотных земель в пределах речного бассейна [32, 43] или какой-либо другой относительно крупной территориальной единицы. Для оценки смыва и аккумуляции в пределах небольших пахотных водосборов важно учитывать, при каком проективном покрытии поверхности почвы выпадал конкретный стокоформирующий дождь, так как это существенно сказывается на интенсивности перераспределения наносов, в том числе внутри пашни [8]. Подобная информация может быть доступна только при мониторинговых наблюдениях на экспериментальных водосборах. Тем не менее, диапазон варьирования рассчитанных по модели темпов эрозии почв при условной неопределенности С-фактора оказался сопоставим и даже несколько ниже диапазона варьирования расчетов по почвенно-морфологическому методу, обусловленного неоднозначностью выбора эталона и сложностью

точного определения длительности распашки конкретных участков.

Другим недостатком модели WATEM/SEDEM является недостаточная точность оценок расположения зон аккумуляции, особенно за пределами пашни. Ошибки, возникающие внутри пашни, в большей степени обусловлены детальностью использованной цифровой модели рельефа. Ранее авторами отмечалось, что площадь и объемы аккумуляции наносов на основе WATEM/SEDEM сильно зависят от разрешения цифровой модели рельефа [5]. Объемы внутрисклонового переотложения наносов в целом по водосбору Спокоевка оказались сопоставимы с оценками, полученными на основе почвенно-морфологического метода. Однако локально (например, в сегменте 2) выявлено неправдоподобное завышение объемов аккумуляции наносов, вероятно, обусловленное артефактами цифровой модели рельефа ALOS. 20-метровое разрешение данной цифровой модели рельефа позволило лишь приблизительно оценить объемы аккумуляции наносов в днищах распахиваемых ложбин в сегменте 9 (рис. 3а). Этот недостаток модели отмечают и в других исследованиях [37].

Расчет механической эрозии почв в модели проводили на основе уравнения диффузии. Алгоритм основан на допущении, что дальность переноса почвенного вещества вверх по склону будет всегда меньше, чем дальность переноса почвенного вещества вниз по склону при проходе сельскохозяйственной техники. Таким образом, среднемноголетнее перемещение почвенного вещества направлено в целом вниз по склону, а основным входным параметром является рельеф. Алгоритм учитывает изменением угла наклона поверхности, а не общий уклон склона. Поэтому на выпуклых поверхностях моделируется вынос, а в локальных понижениях рельефа – аккумуляция наносов. Интенсивность процесса контролируется значением константы диффузии, задаваемым пользователем. К сожалению, калибровка данного блока моделирования крайне затруднительна в связи с отсутствием литературных данных и сложностью полевого измерения данного процесса, в особенности за длительные периоды времени. В связи с этим в данном исследовании использовали стандартные параметры модели. Полученные темпы механической эрозии отражают общую тенденцию перераспределения наносов и не являются точными количественными оценками. Тем не менее, на рис. 3б показаны выявленные на основе моделирования участки переотложения наносов в результате механической эрозии, которые в целом согласуются с результатами полевых исследований в части выявления намывных почв. Модельные расчеты свидетельствуют о существенном вкладе механической эрозии в перемещение почвенной массы, кото-

рый не следует игнорировать. Необходимо дальнейшее более детальное изучение влияния механической эрозии на трансформацию пахотных горизонтов почв.

За пределами пашни на залуженных участках достоверность оценок расположения зон аккумуляции снижается еще в большей степени. Во многом это обусловлено сложностью расчетов транспортирующей способности потоков в условиях высокой вариабельности шероховатости поверхности, что характерно для задернованных склонов [35, 51]. Однако в целом расчеты объемов ежегодной аккумуляции по модели вполне сопоставимы с результатами оценок полевыми методами. Согласно оценкам полевыми методами объем наносов, смываемых с пашни, составляет 350–480 т/год, из которых около 195–225 т/год переоткладывается в днище балки, а остальная часть выносится за пределы водосбора. Объем наносов, смываемых с пашни, оцененный на основе моделей, составляет также около 440 т/год, а доля наносов, переотлагающихся на задернованных бортах, включая лесополосы, и в днище балки — около 300 т/год. Таким образом, разница в примерно 90 т/год приходится на переотложение наносов по пути транспортировки с пашни в днище балки, что составляет порядка 20% от суммарного выноса наносов с пашни. Эта величина представляется реалистичной, особенно учитывая, что на значительном протяжении вдоль нижней границы пашни идет двурядная лесополоса. Известно, что посадка лесополос является эффективным противоэрозионным мероприятием, задерживающим большую часть стока воды и наносов [1]. В ранее рассчитанных балансах наносов в пределах малых пахотных водосборов, расположенных на возвышенностях европейской территории России, доля аккумуляции на задернованных бортах сухих долин оценивалась в интервале от 7.5 до 19% [4, 30], но на этих водосборах отсутствовали лесополосы на границе пашни и бортов балки.

Наконец, существенным недостатком модели является отсутствие блока расчета овражной эрозии, весьма характерной для пахотных земель и нераспахиваемых бортов долин, расположенных ниже пахотных склонов [32]. Отсутствие подобного блока могло сказаться на точности оценок перераспределения почвенного вещества на исследуемом водосборе, поскольку строение стратоземов в днище балки позволяет предположить существование крупных линейных размывов в днищах склоновых ложбин на каком-то этапе освоения. Наличие подобных размывов подтверждается прослоями серо-бурого цвета в стратоземах в днище балки, которые, вероятно, формировались при размыве горизонта А1В. Это свидетельствует, что глубина промоин могла составлять более 50 см. Важно отметить, что во всех исследованных разрезах в днище балки прослой с выра-

женным бурым оттенком встречаются в интервале глубин от 25 до 64 см, то есть маркируют какой-то временной отрезок интенсификации процессов линейной эрозии. Вышележащая толща наносов характеризуется темно-серым цветом с небольшой примесью бурого оттенка. Отсутствие бурых прослоев в современных наносах подтверждает выводы о существенном сокращении талого смыва, как следствие, вероятно, приведшем к сокращению интенсивности линейных размывов в днищах ложбин в последние десятилетия.

В целом сопоставление оценок суммарного смыва на пашне и выноса почвенного вещества за ее пределы, полученных для двух вариантов расчета с использованием почвенно-морфологического метода и расчетом по эрозионным моделям, позволяет утверждать, что модель WATEM/SEDEM совместно с модифицированной моделью ГГИ может быть успешно использована для оценок перераспределения и потерь черноземов в пределах агроландшафтов Среднерусской возвышенности. Хорошая сходимости оценок балансов наносов на основе эрозионного моделирования и почвенно-морфологического метода свидетельствует о том, что моделирование позволяет оценивать темпы деградации почв от эрозии в целом при осреднении на уровне малого водосбора. Сравнение темпов эрозии почв, рассчитанных по моделям и по почвенно-морфологическому методу в среднем по сегментам распаханых склонов, показало, что в сегментах 1, 2, 3, 5, 9, 10 расчетные темпы эрозии оказались в диапазоне варьирования оценок по почвенно-морфологическому методу с учетом погрешности методов 15–20%. В сегментах 4, 6, 7, 8 различия составили 25–50%. Тем не менее, тренды различий в темпах эрозии почв (максимальных по водосбору в сегменте 4, средних — в сегментах 6 и 7, низких — в сегменте 8) прослеживаются во всех случаях. Данные сегменты (4, 6, 7, 8) расположены близко друг от друга в северо-восточной части водосбора. Можно предположить, что в данной части водосбора проводились какие-то агротехнические мероприятия, отличные от остальной части распаханной территории, которые могли повлиять на состояние почвенного покрова либо характер протекания эрозионных процессов.

Еще более детальное сопоставление расчетных и фактических эрозионных потерь почв в отдельно взятых точках опробования свидетельствует о больших различиях в оценках. Таким образом, связь между потенциальными темпами эрозии почв, рассчитанными по модели, и фактическими эрозионными потерями увеличивается при уменьшении масштаба в ряду точки опробования — сегменты склонов—водосбор. Еще более четко подобная связь была выявлена при исследованиях на полях Курской опытной станции на участке площадью около 225 км² [6] и для всей пашни

Прохоровского района Белгородской области площадью около 850 км² [5]. Расхождения между расчетными и фактическими эрозионными потерями почв в супердетальном масштабе обусловлены: а) наложением множества локальных факторов почвообразования и переноса почвенного вещества; б) недостаточной детальностью входных параметров моделирования. При переходе в масштаб малого водосбора или бассейна средней реки увеличивается сходимость результатов, диагностируемых разными методами, поскольку детальность входных параметров моделирования лучше соответствует масштабу и при этом некоторые случайные факторы нивелируются.

Важно отметить специфическую пространственную структуру проявлений эрозионно-аккумулятивных процессов на водосборе Спокоевка, характеризующуюся чередованием зон смыва и переотложения наносов и отсутствием больших по площади ареалов смыва почв. В частности, самый большой ареал водной эрозии (в нижней части сегмента 7) является одновременно зоной переотложения наносов в результате перемещения почвенного вещества сельскохозяйственной техникой. В сегментах 4 и 9 зоны смыва чередуются с зонами аккумуляции в днищах мелких распахиваемых ложбин. Указанная структура эрозионно-аккумулятивных процессов привела к формированию специфического рисунка почвенного покрова, при котором эродированные, намывные и смыто-намывные почвы не образуют больших по площади ареалов, происходит формирование мелкоконтурных комплексов почв с различной степенью и знаком (смыв/намыв) эрозионной деградации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сопоставление расчетов по моделям с фактическими потерями почвы на пашне, установленными на основе использования почвенно-морфологического метода, и объемами суммарных отложений смытых с пашни наносов в днище балки, определенными на основе применения радиоизотопного и почвенно-морфологического методов, свидетельствуют об их хорошей сходимости. Важным достоинством модели WATEM/SEDEM, помимо хорошей точности среднесезонных оценок потерь почвы, является учет вклада механической эрозии в перераспределение почвенного вещества внутри пашни, а также реалистичное отражение расположения участков с различной интенсивностью смыва.

К недостаткам модели следует отнести недостаточную точность оценок расположения зон аккумуляции почвенного вещества, как на пашне, так и за ее пределами, а также отсутствие блока расчетов овражной эрозии. Еще одним ограничением, свойственным всем эрозионным моде-

лям, является сложность сбора достоверной и детальной информации о составе и чередовании полевых культур на пашне за длительный период, и о точном времени выпадения стокоформирующих ливней на протяжении теплого сезона.

Модифицированная модель ГГИ, использованная для расчета темпов талого смыва, ранее верифицирована на основе данных мониторинговых наблюдений [11]. Ее применение позволяет получать достоверные данные о среднегодовых потерях почвы в период снеготаяния, но только при формировании стока на хорошо промерзшей почве. Возможность оценки переотложения наносов на пашне и за ее пределами отсутствует.

Наконец, недостатками использованных моделей является недоучет потерь почвы за счет развития линейной эрозии, а именно формирования крупных промоин. Это важно при большой продолжительности расчетного периода, поскольку интенсивность линейной эрозии на исследованном водосборе в последние десятилетия значительно сократилась, вероятно, в связи с резким уменьшением талого стока и смыва.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 19-29-05025мк (разделы по полевым исследованиям: оценке скорости осадконакопления в днище балки на основе радиоцезиевого метода и использование почвенно-морфологического метода) и РНФ, проект 22-17-00071 (разделы цифровое моделирование эрозионно-аккумулятивных процессов, верификация моделей).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонов В.В. Использование гидротехнических сооружений в противоэрозионной лесомелиорации // Лесное хозяйство. 1991. № 9. С. 31–33.
2. Барабанов А.Т., Долгов С.В., Коронкевич Н.И., Панов В.И., Петелько А.И. Поверхностный сток и инфильтрация в почву талых вод на пашне в лесостепной и степной зонах Восточно-Европейской равнины // Почвоведение. 2018. № 1. С. 62–69. <https://doi.org/10.7868/S0032180X18010069>
3. Безухов Д.А., Голосов В.Н., Панин А.В. Оценка коэффициента доставки наносов малых водосборов в лесостепных и степных районах Восточно-Европейской равнины // Известия РАН. Сер. географическая. 2019. № 4. С. 73–84. <https://doi.org/10.31857/S2587-55662019473-84>
4. Голосов В.Н. Эрозионно-аккумулятивные процессы в речных бассейнах освоенных равнин. М.: ГЕОС, 2006. 296 с.

5. Жидкин А.П., Голосов В.Н., Добрянский А.С. Оценка применимости цифровых моделей рельефа для моделирования эрозии почв (на примере малого водосбора в Курской обл.) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 133–144. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-133-144>
6. Козлов Д.Н., Жидкин А.П., Лозбенев Н.И. Цифровое картографирование эрозионных структур почвенного покрова на основе имитационной модели смыва (северная лесостепь Среднерусской возвышенности) // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2019. № 100. С. 5–29. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-100-5-35>
7. Кумани М.В. Способы регулирования почвенно-эрозионных процессов и гидрологического режима агроландшафтов Центрально-черноземной зоны. Автореф. дис. ... докт. с./х. н. Курск, 2003.
8. Ларионов Г.А. Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1993. 200 с.
9. Ларионов Г.А., Краснов С.Ф., Литвин Л.Ф., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П. Эмпирическая (статистическая) модель эрозии почв // Эрозионно-русловые системы. М., 2017. С. 154–173.
10. Лисецкий Ф.Н., Светличный А.А., Черный С.Г. Современные проблемы эрозиоведения. Белгород: Константа, 2012. 456 с.
11. Литвин Л.Ф. География эрозии почв сельскохозяйственных земель России. М.: ИКЦ Академкнига, 2002. 255 с.
12. Литвин Л.Ф., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф., Добровольская Н.Г. География динамики земледельческой эрозии почв Европейской территории России // Почвоведение. 2017. № 11. С. 1390–1400. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17110089>
13. Литвин Л.Ф., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф., Добровольская Н.Г., Горобец А.В. География динамики земледельческой эрозии почв Сибири и Дальнего востока // Почвоведение. 2021. № 1. С. 136–148. <https://doi.org/10.31857/S0032180X2101007X>
14. Мальцев К.А., Ермолаев О.П. Потенциальные эрозионные потери почвы на пахотных землях европейской части России // Почвоведение. 2019. № 12. С. 1502–1512. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19120104>
15. Методические указания по составлению крупномасштабных карт эрозионноопасных земель для обоснования почвозащитных мер при внутрихозяйственном землеустройстве. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1996. 50 с.
16. Общесоюзная инструкция по почвенным обследованиям и составлению крупномасштабных почвенных карт землепользований. М.: Колос, 1973. 48 с.
17. Пацукевич З.В., Геннадиев А.Н., Герасимова М.И. Допустимый смыв и самовосстановление почв // Почвоведение. 1997. № 5. С. 634–641.
18. Погода в Артельном, Белгородская область. <https://rp5.ru/> (Дата обращения: 01.11.2021).
19. Сурмач Г.П. Рельефообразование, формирование лесостепи, современная эрозия и противоэрозионные мероприятия. Волгоград, 1992. 172 с.
20. Эрозионно-русловые системы. ИНФРА-М. М., 2017. 702 с.
21. Alatorre L.C., Beguería S., García-Ruiza J.M. Regional scale modeling of hillslope sediment delivery: A case study in the Barasona Reservoir watershed (Spain) using WATEM/SEDEM // J. Hydrology. 2010. V. 391. P. 109–123. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.010>
22. Alewell C., Borrelli P., Meusburger K., Panagos P. Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling // Int. Soil Water Conservation Res. 2019. V. 7. P. 203–225. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.05.004>
23. Batista P.V.G., Davies J., Silva M.L.N., Quinton J.N. On the evaluation of soil erosion models: Are we doing enough? // Earth-Sci. Rev. 2019. V. 197. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102898>
24. Belyaev V.R., Golosov V.N., Sidorchuk A.Yu., Wallbrink P.J., Murray A.S. A comparison of methods for evaluating soil redistribution in the severely eroded Stavropol region, southern European Russia // Geomorphology. 2005. V. 65. № 3–4. P. 173–193. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.09.001>
25. Borrelli D.A., Robinson L.R., Fleischer E., Lugato C., Ballabio C., Alewell K., Meusburger S. et al. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion // Nature Commun. 2013(2017). V. 8. № 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>
26. de Vente J., Poesen J., Verstraeten G., Govers G., Vanmaercke M., Van Rompaey A., Arabkhedri M., Boix-Fayos C. Predicting soil erosion and sediment yield at regional scales: where do we stand? // Earth Sci. Rev. 2013. V. 127. P. 16–29. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.03.002>
27. 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 // Geoderma. 2021. V. 381. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114678>
28. Golosov V.N., Ivanova N.N., Gusarov A.V., Sharifullin A.G. Assessment of the trend of degradation of arable soils on the basis of data on the rate of stratozom development obtained with the use of ¹³⁷Cs as a Chronomarker // Eurasian Soil Science. 2017. V. 50. № 10. P. 1195–1208. <https://doi.org/10.1134/S1064229317100039>
29. Golosov V., Koiter A., Ivanov M., Maltsev K., Gusarov 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. 2018c. V. 18. № 12. P. 3388–3403. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2032-1>
30. 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 Cher-

- nobyl fallout // *J. Environ. Radioact.* 2018b. V. 186. P. 78–89.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.06.022>
31. 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>
 32. Haregeweyn N., Poesen J., Verstraeten G., Govers G., de Vente J., Nyssen J., Deckers J., Moeyersons J. Assessing the performance of a spatially distributed soil erosion and sediment delivery model (WATEM/SEDEM) in Northern Ethiopia // *Land Degradation and Development.* 2013. V. 24. P. 188–204.
<https://doi.org/10.1002/ldr.1121>
 33. Karydas C.G., Panagos P., Gitas I.Z. A classification of water erosion models according to their geospatial characteristics // *Int. J. Digital Earth.* 2012. V. 7. № 3. P. 229–250.
<https://doi.org/10.1080/17538947.2012.671380>
 34. Khitrov N., Smirnova M., Lozbenev N., Levchenko E., Gribov V., Kozlov D., Rukhovich D., Kalinina N., Koroleva P. Soil cover patterns in the forest-steppe and steppe zones of the east-european plain // *Soil Sci. Annual.* 2019. V. 70. № 3. P. 198–210.
<https://doi.org/10.2478/ssa-2019-0018>
 35. Krása J., Dostál T., Vrana K., Plocek J. Predicting spatial patterns of sediment delivery and impacts of land-use scenarios on sediment transport in Czech catchments // *Land Degradation Development.* 2010. V. 2. P. 367–375.
<https://doi.org/10.1002/ldr.959>
 36. Lal R. Soil erosion by wind and water: problems and prospects // *Soil erosion research methods. Soil and Water Conservation Society / Ed. Lal R.* St. Lucie Press, America. 1994. P. 1–9.
<https://doi.org/10.1201/9780203739358-1>
 37. Lieskovský J., Kenderessy P. Modelling the effect of vegetation cover and different tillage practices on soil erosion in vineyards: a case study in vrábľa (Slovakia) using WATEM/SEDEM // *Land Degrad. Dev.* 2014. V. 25. № 3. P. 288–296.
<https://doi.org/10.1002/ldr.2162>
 38. Lobb D.A., Kachanoski R.G., Miller M.H. Tillage translocation and tillage erosion on shoulder slope landscape positions measured using ¹³⁷Cs as a tracer // *Can. J. Soil Sci.* 1995. V. 75. P. 211–218.
<https://doi.org/10.4141/cjss95-029>
 39. Lozbenev N., Yurova A., Smirnova M., Kozlov D. Incorporating process-based modeling into digital soil mapping: A case study in the virgin steppe of the Central Russian upland // *Geoderma.* 2021. V. 383.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114733>
 40. Panagos P., Borrelli P., Meusburger K. 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>
 41. Pandey A., Himanshu S.K., Mishra S.K., Singh V.P. Physically based soil erosion and sediment yield models revisited // *Catena.* 2016. V. 147. P. 595–620.
<https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2016.08.002>
 42. Panin A.V., Walling D.E., Golosov V.N. The role of soil erosion and fluvial processes in the post-fallout redistribution of chernobyl-derived caesium-137: a case study of the Lipki catchment, Central Russia // *Geomorphology.* 2001. V. 40. № 3–4. P. 185–204.
[https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00043-5](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00043-5)
 43. Pietroni J., Chalov S.R., Chalova A.S., Alekseenko A.V., Jarsjö J. Extreme spatial variability in riverine sediment load inputs due to soil loss in surface mining areas of the Lake Baikal basin // *Catena.* 2017. V. 152. P. 82–93.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.008>
 44. Pruski F.F., Nearing M.A. Climate-induced changes in erosion during the 21st century for eight U.S. locations // *Water Resources Res.* 2002. V. 38. № 12. P. 34–1–34–11.
<https://doi.org/10.1029/2001WR000493>
 45. Sediment transport using WaTEM/SEDEM: [Электронный ресурс]. URL: <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/themes/sediment-transport-using-watemsedem>. (Дата обращения: 10.11.2021).
 46. Tsybarovich P., Kust G., Kumani M., Golosov V., Andreeva O. Soil erosion: An important indicator for the assessment of land degradation neutrality in Russia // *Int. Soil Water Conserv. Res.* 2020. V. 8. № 4. P. 418–429.
<https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.06.002>
 47. Van Loo M., Dusara B., Verstraetena G., Renssen H., Notebaert B., D'Haen K., Bakker J. Human induced soil erosion and the implications on crop yield in a small mountainous Mediterranean catchment (SW-Turkey) // *catena.* 2017. V. 149. P. 491–504.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.08.023>
 48. Van Oost K., Cerdan O., Quine T.A. Accelerated fluxes by water and tillage erosion on European agricultural land // *Earth Surface Processes and Landforms.* 2009. V. 34. P. 1625–1634.
<https://doi.org/10.1002/esp.1852>
 49. Van Oost K., Govers G., 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>
 50. 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>
 51. Verstraeten G., Prosser I.P., Fogarty P. Predicting the spatial patterns of hillslope sediment delivery to river channels in the Murrumbidgee catchment, Australia // *J. Hydrology.* 2007. V. 334. P. 440–454.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.10.025>
 52. Zhidkin A., Fomicheva D., Ivanova N., Dostál T., Yurova A., Komissarov M., Krása J. A detailed reconstruction of changes in the factors and parameters of soil erosion over the past 250 years in the forest zone of European Russia (Moscow region) // *Int. Soil Water Conservation Res.* 2022. V. 10. P. 149–160.
<https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.06.003>

Erosion Models Field Verification Based on Studies of a Small Catchment in the Vorobzha River Basin (Kursk Region, Russia)

V. N. Golosov^{1,2,3}, A. P. Zhidkin^{4,*}, A. I. Petel'ko⁵, M. S. Osipova⁴, N. N. Ivanova¹, and M. M. Ivanov^{1,2}

¹*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

²*Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia*

³*Kazan Federal University, Kazan, 420008 Russia*

⁴*Dokuchaev Soil Institute, Moscow, 119017 Russia*

⁵*Novosilsk Zonal Agroforest Reclamation Experimental Station, Branch of the Federal Scientific Center for Agroecology of the Russian Academy of Sciences, Mtsensk, 303035 Russia*

**e-mail: gidkin@mail.ru*

Verification of soil erosion models (WATEM/SEDEM for rainfall and tillage soil erosion and modified version of State Hydrological Institute model for snowmelt soil erosion) was carried out on the basis of field evaluation of soil erosion and sedimentation rates in the arable catchment located in the basin of the Vorobzha River, located in the central part of the Central Russian Upland in the forest-steppe zone. The rates of soil losses and sediment deposition for the entire period of agricultural use were obtained using the soil truncation method. The rate of sediment deposition in the bottom of the dry valley for the time window 1986–2020 was determined based on the interpretation of the Chernobyl-derived caesium-137 vertical distribution in the stratozems. Comparison of the model calculations with field estimates were generally in good agreement. Also, the results of the model calculations satisfactorily characterized the pattern of zones with different intensity of soil losses. Also application of WATEM/SEDEM made it possible to evaluate tillage erosion rates. Some discrepancies between results of the model application and field-based assessment were mainly due to the insufficient detail of the model input parameters, for example, data on crop rotations or microrelief features of the catchment slopes. WATEM/SEDEM did not enough accurately estimate the rate and volume of sediment deposition, especially outside of arable land.