

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2019-100-5-35

Ссылки для цитирования:

Козлов Д.Н., Жидкин А.П., Лозбенев Н.И. Цифровое картографирование эрозионных структур почвенного покрова на основе имитационной модели смыва (северная лесостепь Среднерусской возвышенности) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2019. Вып. 100. С. 5-35. DOI: 10.19047/0136-1694-2019-100-5-35

Cite this article as:

Kozlov D.N., Zhidkin A.P., Lozbenev N.I., Digital mapping of soil cover eroded patterns on the basis of soil erosion simulation model (northern forest-steppe of the Central Russian Upland), Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, V. 100, pp. 5-35, DOI: 10.19047/0136-1694-2019-100-5-35

Цифровое картографирование эрозионных структур почвенного покрова на основе имитационной модели смыва (северная лесостепь Среднерусской возвышенности)

© 2019 г. Д. Н. Козлов*, А. П. Жидкин, Н. И. Лозбенев

*Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Россия,
119017, Москва, Пыжжевский пер, 7, стр. 2,*

**<https://orcid.org/0000-0003-0103-0300>, e-mail: Kozlov_DN@esoil.ru,*

*Поступила в редакцию 22.01.2019, после доработки 27.09.2019,
принята к публикации 18.12.2019*

Резюме: В работе представлены оригинальные разработки по применению эрозионной модели WaTEM/SEDEM для крупномасштабного картографирования эрозионных структур почвенного покрова Среднерусской возвышенности. Оценка участия смытых почв в составе почвенных комбинаций распаханых склонов проведена на основе сопоставления расчетных темпов смыва с результатами почвенно-морфологической диагностики степени эродированности черноземов в 859 точках. При заданных входных параметрах эрозионной модели качественные изменения в структуре почвенного покрова (доля слабосмытых почв более 10%) начинаются с порогового значения водной эрозии $8 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$. При среднегодовой эрозии $30 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ доля смытых почв превышает 50%. Полученные отношения между встречаемостью почв эрозионно-аккумулятивного

ряда и интенсивностью смыва использованы для построения карты типизированных комбинаций почв разной эродированности. Сравнение с материалами детальной почвенной съемки показало, что карта отражает пространственное разнообразие и конфигурацию эрозионных почвенных комбинаций. Разработанный подход представляется перспективным для решения фундаментальных и прикладных задач, связанных с изучением структурно-функциональной организации почвенного покрова склонов и проектированием противоэрозионных мероприятий в адаптивно-ландшафтном земледелии.

Ключевые слова: расчетные темпы эрозии, WaTEM/SEDEM, эрозионная деградация черноземов.

Digital mapping of soil cover eroded patterns on the basis of soil erosion simulation model (northern forest-steppe of the Central Russian Upland)

D. N. Kozlov* , A. P. Zhidkin, N. I. Lozbenev

V.V. Dokuchaev Soil Science Institute,

7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 2119017, Russian Federation,

**<https://orcid.org/0000-0003-0103-0300>, e-mail: Kozlov_DN@esoil.ru.*

Received 22.01.2019, Revised 27.09.2019, Accepted 18.12.2019

Abstract: The paper presents original developments on the application of WaTEM/SEDEM erosion model for large-scale mapping of erosion patterns of the soil cover in the Central Russian Upland. The share of eroded soils in the composition of soil combinations on plowed slopes was evaluated; such estimation was carried out on the basis of a statistical comparison of the calculated rates of soil losses with the results of actual soil-morphological diagnostics of the degree of chernozems erosion. The obtained relations between share of eroded soils in soil cover patterns and modelled erosion rates were used for development of the map depicting typified combinations of soils with various degrees of erosion. Comparison with detailed soil survey materials showed that the map is accurate enough for the spatial diversity and configuration of eroded soils combinations description. At the given input parameters of the erosion model qualitative changes in the soil cover structure (share of slightly-eroded soils is more than 10%) start from the threshold value of water erosion of $8 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$. With an average annual erosion of $30 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$, the share of denuded soils exceeds 50%. The developed approach seems to be promising for solving fundamental and applied problems related to the study of structural and functional organization of the soil cover of slopes

and for planning the erosion control measures in adaptive-landscape agriculture.

Keywords: estimated erosion rates, WaTEM/SEDEM, erosive degradation of chernozems.

ВВЕДЕНИЕ

Влияние водной эрозии на состояние почвенно-земельных ресурсов – многогранная актуальная проблема, широко освещенная в литературе ([Рождков, 2007](#); [Научные основы..., 2013](#)). Поверхностный твердый сток приводит к дифференциации почвенного покрова, образуя комбинации несмытых, смытых, намывтых и смыто-намывтых почв, снижающих плодородие склоновых земель и ведущих к их эрозионной деградации ([Научные основы..., 2013](#)). Изучение почвенного покрова эрозионных склонов и оптимизация их сельскохозяйственного использования связаны с развитием междисциплинарных подходов географии почв, эрозиоведения и земледелия с привлечением современных средств пространственного анализа и физико-математического моделирования.

В области эрозиоведения накоплен огромный эмпирический материал. Более полувека ведутся попытки обобщить собранные данные в виде математических моделей, выражающих зависимость поверхностного смыва почв (т/га в год или мм/год) от климатических, топографических, почвенно-литологических и хозяйственных факторов ([Karydas et al., 2014](#); [Dhami, Pandey, 2013](#); [Pandey et. al., 2016](#); [Сурмач, 1979](#); [Мирицхулава, 2000](#); [Ларионов, 1993](#); [Светличный и др., 2004](#); [Сухановский, 2010](#) и др.). Расчетные методы используются для картографирования классов эрозионной опасности земель по величине потенциального смыва и проектирования противоэрозионных мероприятий в системе внутрихозяйственного землеустройства ([Методические рекомендации, 1985](#); [Методические указания..., 1989](#); [Revised..., 2008](#)) и адаптивно-ландшафтного земледелия ([Кирюшин, 2011](#); [Смирнова и др., 2012](#)). Комплекс организационно-хозяйственных, агротехнических, лесомелиоративных и гидротехнических противоэрозионных мероприятий призван обеспечить допустимый уровень потенциального смыва, компенсируемый процессами почвообразования ([Сурмач, 1992](#); [Методическое пособие..., 2001](#)) либо агро-

техническими приемами воспроизводства почвенного плодородия ([Кузнецов и др., 2002](#)).

В географии почв расчетные методы поверхностного смыва перспективны для изучения механизмов и скорости агрогенной трансформации почв и почвенного покрова склонов ([Сорокина, 1988](#); [Клещенко и др., 2016](#)), и, в более общем случае, – для изучения структурно-функциональной организации денудационно-аккумулятивных структур почвенного покрова ([Фридланд, Глазовская, 1979](#); [Козлов и др., 2017](#)). В числе прочего эти работы направлены на обоснование региональных особенностей эродированности почв и трансформации почвенного покрова при одинаковых темпах водной эрозии за одинаковый интервал времени ([Клещенко, 2015](#)).

В условиях сокращения отечественной сети эрозионных стационаров ([Литвин, 2002](#)) важное значение имеет развитие косвенных методов оценки эродированности на основе сопоставления расчетных темпов водной эрозии с различными индикаторами фактической смытости почв ([Жидкин и др., 2015](#)) и показателями эрозионной трансформации почвенного покрова склонов ([Клещенко и др., 2016](#)). В этом отношении эффективны новые методы и технологии мониторинга склоновых процессов ([Eltner et al., 2014](#)), алгоритмы имитационного моделирования стока ([Golden et al., 2014](#)), аналитические средства геоморфометрии ([Florinsky, 2016](#)), педометрики и цифровой почвенной картографии ([Minasny, McBratney, 2015](#)). Помимо познавательной ценности новые технологические возможности способны компенсировать высокую трудоемкость действующих методик картирования эрозионноопасных земель и проектирования противоэрозионных мероприятий. Однако для формирования нового технологического уклада практики землеустроительных работ и организации противоэрозионных систем земледелия необходимы научно-методические изыскания, к числу которых относятся и материалы данной статьи.

Целью исследования являлась разработка методических подходов к цифровому картографированию эрозионной деградации пахотных земель на расчетной основе. Показателем эрозионной деградации служит степень трансформации почвенного покрова, выраженная участием почв эрозионно-аккумулятивного

ряда в составе почвенных комбинаций склонов ([Сорокина, 2005](#)). В первую очередь исследование направлено на обоснование принципа согласования расчетных темпов эрозии с компонентным составом эрозионных почвенных комбинаций. Другие методические вопросы цифрового почвенно-эрозионного картографирования, в частности, обоснование эрозионной модели и значений ее управляющих параметров, составляют предмет будущих исследований.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследование выполнено на полях Курской опытной станции – полигона с длительной историей изучения почв и почвенного покрова Среднерусской лесостепной провинции возвышенных эрозионных равнин ([Сорокина, 1976](#); [Фишман, 1977](#); [Kozlov et al., 2018](#)). Соседство с целинными участками Центрально-Черноземного заповедника (рис. 1) позволяет проводить оценку степени трансформации пахотных почв в сравнении с их ненарушенными аналогами ([Целищева, Дайнеко, 1966](#)).

Почвенный покров междуречных равнин представлен пятнистостями черноземов типичных, выщелоченных и типичных карбонатных с участием луговато-черноземных почв в днищах водосборных понижений. Значительный перепад высот (110 м) при густоте овражно-балочного расчленения 1.3 км/км^2 определил широкое участие в границах пашни склоновых земель (37%), подверженных плоскостной эрозии с темпами $5\text{--}20 \text{ т}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ ([Литвин, 2002](#); [Голосов и др., 2012](#)). Как следствие в составе их почвенного покрова принимают участие слабо- и среднесмытые черноземы. Относительно невысокая степень эрозионной деградации склоновых земель связана с коротким периодом распашки почв с мощным и сверхмощным гумусовым горизонтом.

Земледельческое освоение участка началось в середине XVIII в. с придолинных склонов р. Сейм. Полное освоение междуречных равнин под пашню совпадает с периодом организации Центрально-Черноземного заповедника в 1935 г. До 20-х годов XX в. применялся трехпольный севооборот: пар – озимые – яровые, сменившийся пятипольем: пар – однолетние травы – озимые – яровые – пропашные ([Кузнецова и др., 2011](#)). Противоэрозионное землеустройство выполнено в 1960-х годах, оно включало ор-

ганизацию полевых защитных лесополос и введение почвозащитных севооборотов на склонах.

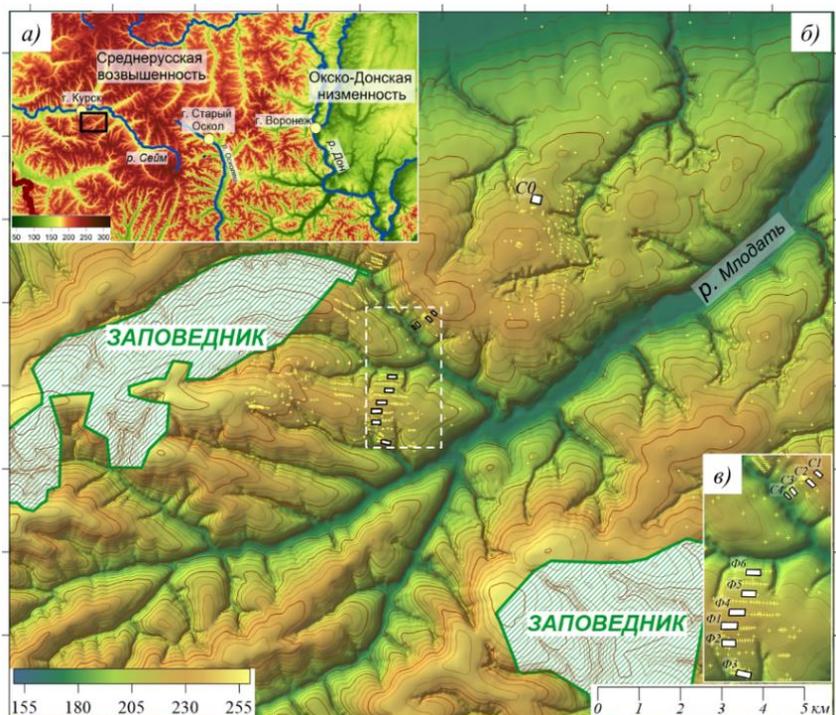


Рис. 1. Физико-географическое положение (а) и рельеф региона исследования (б) с положением площадок детальной почвенной съемки (в) и точек почвенного опробования.

Fig. 1. The geographical location (а) and topography of the study area (б) with the location of sites for detailed soil survey (в) and points of soil studies.

Соотношение талой и ливневой эрозии в регионе находится в сложной зависимости от погодно-климатических и агрономических условий (Литвин, 2002). Последние десятилетия с мягкими зимами и частыми оттепелями отмечены снижением весеннего склонового стока (Барабанов и др., 2018). Однако в ротациях севооборотов при соблюдении комплекса противоэрозионных мероприятий темпы ливневой эрозии уступают талой (Сурмач, 1992).

Принципиальная схема исследования включает пять этапов:

- 1) расчет темпов смыва почв по элементам регулярной сетки на основе эрозионной модели (рис. 3);
- 2) оценка фактической степени эродированности почв на представительном массиве точек полевого опробования;
- 3) сопоставление расчетных темпов смыва и фактической эродированности почв (рис. 4а, 4б);
- 4) построение карт компонентного состава эрозионных почвенных комбинаций на расчетной основе (рис. 5, 6);
- 5) верификация результатов (рис. 7).

Темпы смыва оценены в соответствии с моделью WaTEM/SEDEM v.2004 ([Van Oost et al., 2000](#); [Van Rompay et al., 2001](#)), учитывающей взаимодействия между эрозионным потенциалом дождевых осадков, эродируемостью почв, эрозионным индексом возделываемых культур в среднесезонном севообороте и особенностями рельефа. Алгоритм расчета базируется на модифицированном универсальном уравнении смыва почв RUSLE ([Renard et al., 1997](#)) и имеет сходные входные параметры. Эрозионный индекс дождевых осадков ($0.029 \text{ МДж} \cdot \text{мм} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$) был взят из базы данных Global Rainfall Erosivity ([Panagos et al., 2017](#)). Значения эродируемости почв ($K = 35 \text{ кг} \cdot \text{ч} \cdot \text{МДж}^{-1} \cdot \text{мм}^{-1}$) получены в соответствии с эмпирическим обобщением из руководства RUSLE ([Renard et al., 1997](#)) с параметрами пахотного горизонта черноземов типичных среднесуглинистого состава:

$$K = [(0.00021 \times M^{1.4} \times (12 - OM) + 3.25 \times (s - 2) + 2.5 \times (p - 3)/100] \times 0.1317,$$

где M – показатель гранулометрического состава почв, взятого по трем фракциям $M = (m_{0.002} + m_{v,0.002-0.05}) \times (100 - m_{0.05-0.1}) = 4270$; OM – содержание органического углерода (3.64%), s – категория оструктуренности почв (2 – мелкозернистая, 2–5 мм), p – категория водопроницаемости почв (4 – умеренно низкая).

Для расчетов длины линий тока и крутизны поверхности (LS-фактор) использована цифровая модель рельефа (ЦМР), по-

строенная по высотным отметкам топографической карты с рекомендуемыми для модели WaTEM/SEDEM размерами ячейки 20 × 20 м. При таком пространственном разрешении ЦМР расчетные значения LS-фактора отражают стокоформирующее влияние мезорельефа.

Расчет выполнен для единого массива пашни без учета конфигурации полевой инфраструктуры и лесомелиоративных полос (рис. 3). Почвозащитная роль возделываемых культур за ротацию севооборота относительно эродированности чистого пара задана значением 0.4 для всего периода земледельческого освоения ([Сурмач, 1992](#)). Такие допущения продиктованы стремлением охарактеризовать максимальные проявления плоскостной эрозии в отсутствии достоверных сведений о структуре и динамике землепользования в границах модельного участка.

Фактическая степень смытости почв пашни диагностировалась в 859 пунктах по морфологическим признакам и вертикальному распределению гумуса. Использована региональная схема диагностики почв эрозионно-аккумулятивного ряда Курской опытной станции ([Сорокина, 1966](#); [Научные основы..., 2013](#)). Мощность гумусового горизонта несмытых черноземов составляет 74 ± 13 см при отношении $A/(A + AB)$ 0.5–0.7 и содержании гумуса в пахотном горизонте 5.8–6.4% (Э0, гор. А = 60–85 см, 595 описаний). При сокращении гумусового горизонта на 30% почва диагностировалась как слабоэродированная (Э1, гор. А = 40–60 см, 204 описания), на 50% – как среднеэродированная (Э2, гор. А = 30–40 см, 60 описаний). Сильноэродированные почвы с полностью смытым гумусовым горизонтом не обнаружены. При мощности гор. А более 85 см черноземы диагностировались как намытые.

Расчетные значения отражают стокоформирующее влияние мезорельефа, в то время как организация эрозионных элементарных почвенных ареалов контролируется мезо-, микро- и нанорельефом и выявляется при почвенно-топографической съемке в детальном масштабе (рис. 2). Как следствие, одинаковым значениям расчетного смыва соответствуют почвы разной эродированности (рис. 4а). Их соотношение меняется от низких к высоким темпам (рис. 4б) и поддается статистической оценке через условную веро-

следующий анализ позволяет для каждого пикселя получить: 1) наиболее вероятную почвенную категорию; 2) неопределенность прогноза как максимальное значение вероятности; 3) типы сочетаний наиболее вероятной (преобладающей) почвенной категории с двумя сопутствующими ([Козлов, Сорокина, 2012](#)). Типизация ПК проведена в соответствии с существующими нормативами ([Общесоюзная инструкция..., 1976](#)). Всего выделено шесть групп ПК: 1 – зональные с преобладанием несмытых почв ($\Sigma 0 > 0.9$); 2 – эрозионно-зональные с долей смытых почв 0.1–0.25; 3 – слабоэродированные с долей смытых почв 0.25–0.5; 4 – среднеэродированные с долей смытых почв больше 0.5 и преобладанием слабосмытых над среднесмытыми; 5 – сильноэродированные с долей смытых почв больше 0.5 и преобладанием среднесмытых над слабосмытыми; 6 – намытые. Изображение наиболее вероятной почвенной категории показывает ареалы преобладающей почвы (рис. 5в), а изображение типизированных сочетаний преобладающих и сопутствующих категорий – ареалы групп почвенных комбинаций (рис. 6).

Верификация результатов картографического моделирования проведена путем сопоставления компонентного состава ПК характерных элементов мезорельефа, полученных в соответствии с эрозионной моделью и на основе детальной почвенной съемки одиннадцати ключевых участков площадью 0.25–0.5 га ([Сорокина, 1976](#); [Фишман, 1977](#)).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Карта расчетной интенсивности эрозионно-аккумулятивных процессов (рис. 3) отражает различия в потенциальных темпах смыва почв в связи с морфологией склонов. Интенсивность смыва возрастает по мере увеличения протяженности и крутизны склонов и на покатых прибалочных склонах превышает $40 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$.

По интенсивности смыва 60% площади пашни относится к землям с незначительной эрозионной опасностью; 20% – слабой; 10% – средней, 3% – сильной; 1% – очень сильной ([Методические указания..., 1989](#)). Еще 6% пашни относятся к землям с потенциально намытыми почвами, в том числе со значимыми темпами аккумуляции (более $3 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$) – 1%. В первую очередь это выпо-

ложенные участки склонов, снижающие транспортирующую способность водных потоков, а также днища ложбин, концентрирующие сток. Подавляющая часть наносов аккумулируется за пределами пашни.

Средние темпы смыва по всему массиву пашни $4.2 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ адекватны существующим оценкам для лесостепи Среднерусской возвышенности ([Литвин, 2002](#)). Однако расчетные значения смыва для покатых склонов (более $40 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$) следует считать завышенными. При таких темпах эрозии за 100 лет почвенный профиль сократился бы более чем на 40 см, и почва диагностировалась как сильносмывтая. Такие почвы при полевом обследовании не встретились, несмотря на имеющиеся указания об их ограниченном участии в составе почвенного покрова старопахотных прибалочных склонов ([Тишкина, Иванова, 2010](#)).

Существующие региональные оценки темпов смыва распаханых склонов не превышают $20 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ ([Литвин, 2002](#)). В том числе на представительном для объекта исследований экспериментальном водосборе ([Голосов и др., 2012](#); [Жидкин и др., 2015](#)) темпы эрозии для пологих склонов разной экспозиции определены пятью методами в диапазоне $2\text{--}19 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$. Завышение темпов смыва имитационными моделями не является исключительным, что наглядно демонстрирует мета-анализ данных многочисленных исследований ([García-Ruiz et al., 2015](#)).

Полученные результаты свидетельствуют о завышении площади классов эрозионной опасности (рис. 3) и необходимости дальнейшего уточнения входных параметров имитационной модели. Однако для целей пространственного моделирования эрозионных структур почвенного покрова абсолютные значения потенциальных темпов смыва не играют определяющей роли, ведущее значение имеют относительные различия расчетных темпов эрозии между склонами разной морфологии.

Для их верификации проведено сопоставление расчетной и фактической эрозии в точках почвенных обследований (рис. 4). В ряду почв возрастающей эродированности наблюдается статистически достоверное увеличение расчетного смыва (рис. 4б).

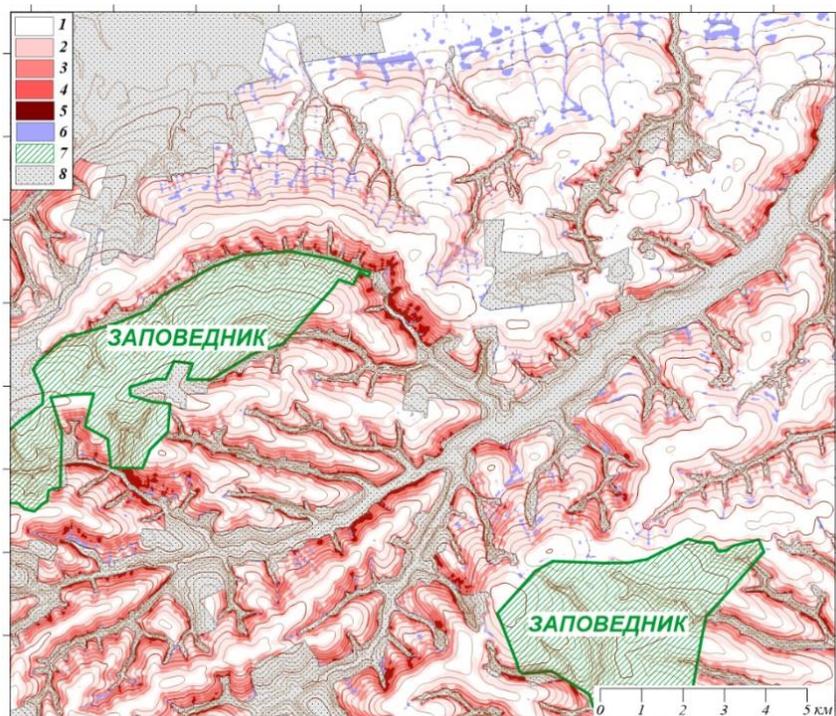


Рис. 3. Карта-схема расчетных темпов эрозионно-аккумулятивных процессов, приведенных к грациям эрозионной опасности ([Методические указания..., 1989](#)): **1**) незначительной (смыв до $3 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$); **2**) слабой ($3\text{--}10 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$); **3**) средней ($10\text{--}20 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$); **4**) сильной ($20\text{--}40 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$); **5**) очень сильной (более $40 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$); **6**) намытые земли (аккумуляция $3\text{--}10 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$); **7**) целинные участки Центрально-Черноземного заповедника; **8**) пастбища, сенокосы, селитебные земли.

Fig. 3. Map scheme of erosion and accumulation processes classified according to erosion-hazard rating ([Методические указания..., 1989](#)): **1**) insignificantly-eroded (soil losses up to $3 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$); **2**) slightly-eroded ($3\text{--}10 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$); **3**) medium-eroded ($10\text{--}20 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$); **4**) highly-eroded ($20\text{--}40 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$); **5**) severely-eroded (over $40 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$); **6**) warpland (accumulation of $3\text{--}10 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$); **7**) virgin lands of the Central Black Earth Reserve; **8**) pastures, hayfields, settlement lands.

Его средние темпы для Э2 почв ($25 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$) в два раза выше, чем для Э1 почв ($13 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$) и в пять раз выше, чем для

Э0 почв ($5 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$). Вместе с тем диапазоны значений расчетного смыва для Э0-Э1-Э2 почв пересекаются, т. е. в пределах элементов мезорельефа с одинаковыми значениями потенциального смыва встречаются почвы разной степени эродированности.

Зависимость доли Э0 почв от интенсивности эрозии (x) описывается Z-сигмоидной функцией (рис. 4в) со “средней” точкой при расчетном смыве $30 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ и коэффициентом крутизны 0.095 (1); доля Э1 почв описывается гауссовой функцией с максимумом при смыве $40 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ (2); Э2 – S-сигмоидной функцией со “средней” точкой при смыве $54 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ и крутизной 0.1 (3).

$$\mu_{\text{Э0}}(x) = \frac{1}{1 + \exp(0.095 \cdot (x - 30))} \quad (1)$$

$$\mu_{\text{Э1}}(x) = \exp\left(-\frac{(x - 40)^2}{2 \cdot 0.05^2}\right) \cdot 0.5 \quad (2)$$

$$\mu_{\text{Э2}}(x) = \frac{1}{1 + \exp(-0.1 \cdot (x - 54))} \quad (3)$$

Установленные соотношения позволяют для каждого элемента регулярной сетки (i, j) рассчитать вектор подобия его почв и почв эрозионного ряда S_{ij} ($S_{ij}^{\text{Э0}}$, $S_{ij}^{\text{Э1}}$, $S_{ij}^{\text{Э2}}$). Последующий анализ вектора подобия позволяет получить для каждого пикселя: 1) наиболее вероятную (преобладающую по площади) почвенную категорию (рис. 5в); 2) меру пестроты состава почвенной комбинации как максимальное из трех значений S_{ij} (рис. 5г); 3) типы сочетаний преобладающей почвенной категории с двумя сопутствующими (рис. 6). Полученные карты (рис. 5, рис. 6) передают различные аспекты состава почвенных комбинаций распахиваемых склонов.

При заданных входных параметрах модели WaTEM/SEDEM эрозионная трансформация почвенного покрова (доля смытых почв 10%) начинается при величине расчетной эрозии $8 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$. Дальнейшее нарастание расчетных темпов смыва сопровождается снижением доли Э0 и синхронным увеличением доли Э1 и Э2 почв в составе ПК склонов (рис. 4в). Суммарная доля смытых почв 25–50–75–90% соответствует значениям смыва 18–30–42–54 $\text{т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$. В интервале значений смыва 32–52 $\text{т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ в соста-

ве почвенных комбинаций преобладают слабосмытые почвы, а начиная с $52 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ – среднесмытые почвы.

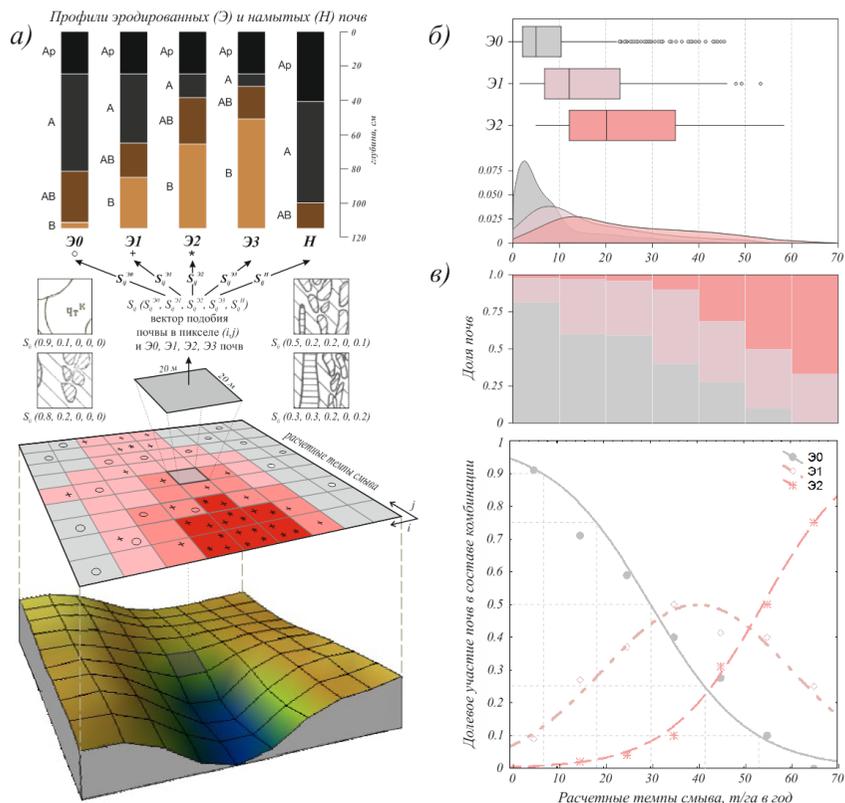


Рис. 4. Сопоставление расчетных темпов смыва с фактической степенью эродированности почв в точках опробования: **а)** схема организации анализа; **б)** сравнение расчетных темпов смыва в точках полевой диагностики Э0-Э1-Э2 почв; **в)** экспериментальная и модельная зависимости состава эрозийных почвенных комбинаций от расчетной интенсивности водной эрозии.

Fig. 4. Comparison of the calculated rates of soil losses with the actual degree of erosion at the studying points: **a)** the scheme of analysis organization; **b)** comparison of the calculated rates of soil denudation at the points of field diagnostics of Э0-Э1-Э2 soils; **c)** experimental and modelled dependence of the composition of eroded soil combinations on the calculated intensity of water erosion.

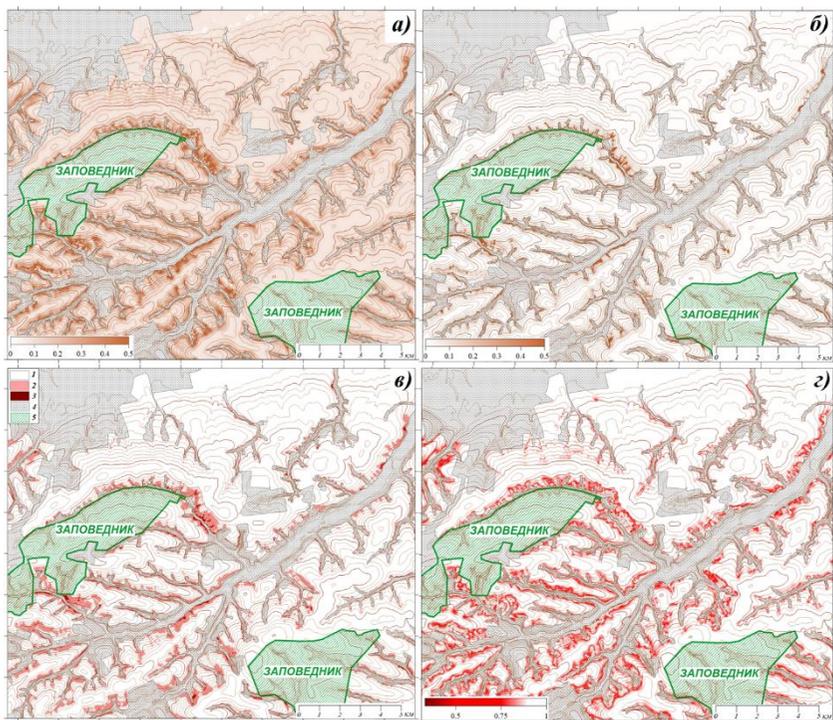


Рис. 5. Компонентный состав эрозионных почвенных комбинаций пашни: *а)* доля Э1 почв; *б)* доля Э2 почв; *в)* преобладающая в составе ПК категория смытости почв (1 – не смытые (Э0), 2 – слабосмытые (Э1), 3 – среднесмытые (Э2)); *з)* мера пестроты состава почвенных комбинаций (0.33 – полидоминантные, 1 – монодоминантные).

Fig. 5. Component structure of eroded soils combinations (SC) of arable lands: *a)* share of Э1 soils; *б)* share of Э2 soils; *в)* prevailing category of eroded soils in the structure of SC (1 – not eroded (Э0), 2 – slightly-eroded (Э1), 3 – medium-eroded (Э2)); *з)* the degree of patchiness in the structure of soil combinations (0.33 – polydominant, 1 – monodominant).

Установленное пространственное разнообразие состава и конфигурации эрозионных почвенных комбинаций (рис. 5, б) качественно соответствует существующим представлениям ([Почвенная карта..., 1965](#); [Сорокина, 1976](#); [Фишман, 1977](#); [Тишкина, Иванова, 2010](#)).

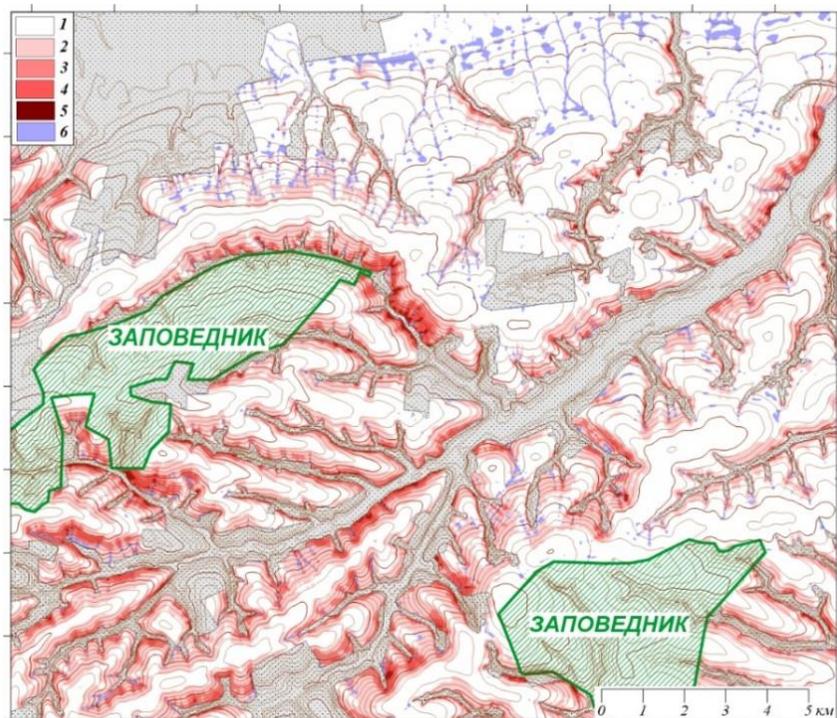


Рис. 6. Группы почвенных комбинаций пашни: **1** – зональные с преобладанием несмытых почв ($E_0 > 0.9$); **2** – эрозивно-зональные с долей смытых почв 0.1–0.25; **3** – слабоэродированные с долей смытых почв 0.25–0.5; **4** – среднеэродированные с долей смытых почв больше 0.5 и преобладанием слабосмытых над среднесмытыми; **5** – сильноэродированные с долей смытых почв больше 0.5 и преобладанием среднесмытых; **6** – намытые в границах области расчетной аккумуляции наносов (рис. 3).

Fig. 6. Groups of soils combinations of arable land: **1** – zonal with predominance of not eroded soils ($E_0 > 0.9$); **2** – erosion-zonal with the share of eroded soils 0.1–0.25; **3** – slightly-eroded with the share of eroded soils 0.25–0.5; **4** – medium-eroded with the share of eroded soils more than 0.5 and where slightly-eroded soils predominate over medium-eroded soils; **5** – highly-eroded soils with the share of eroded soils more than 0.5 and prevalence of medium-eroded ones, **6** – warp soils located within the borders of calculated deposits accumulation area (Fig. 3).

Зональные группы ПК занимают слабонаклонные между-речные равнины, зонально-эрозионные – пологие приводораздельные, а эрозионные – покатые прибалочные склоны. Суммарно эрозионно-зональные и эродированные группы ПК занимают 36% массива пашни, что соответствует общей площади склоновых земель крутизной более 2°. Сильноэродированные группы ПК ограничено (4%) распространены в нижних частях покатых склонов. В северной придолинной части р. Сейм со слаборасчлененным рельефом преобладают зональные и эрозионно-зональные группы ПК. Напротив, в пределах покатых и сильно-расчлененных придолинных склонов р. Млодаты и ее притоков большую роль играют эродированные группы ПК.

При качественном соответствии компонентного состава эрозионных ПК склонам разной морфологии (рис. 6) наблюдается его расхождение с компонентным составом ПК площадок детальной почвенной съемки ([Сорокина, 1976](#); [Фишман, 1977](#)). Из одиннадцати площадок (рис. 1) только для трех (С0, Ф1 и Ф4) фактическая и предсказанная доли смытых почв совпадают (рис. 7). Для четырех площадок С1–С4, заложенных на выпуклом склоне возрастающей крутизны ([Сорокина, 1976](#)), модель завышает долю смытых почв в среднем на 20%. Для склоновых площадок М.И. Фишмана (Ф2, Ф3, Ф5 и Ф6) модель занижает площадь смытых почв.

В последнем случае выявленные расхождения объясняются принятыми М.И. Фишманом критериями диагностики слабо- и среднесмытых черноземов, завышающими их площадь. Об этом можно судить по профильному распределению гумуса в почвах склоновых площадок, приведенному в публикациях ([Фишман, 1971](#); [1977](#)). Например, на площадке Ф3 (рис. 2б) среднее содержание гумуса на глубине 60–70 см среднесмытых черноземов с мощностью А + АВ = 20–40 см ([Фишман, 1977](#)) составляет 3.91% ([Фишман, 1971](#), стр. 24), что превышает нижний порог гумусности горизонта А ([Сорокина, 1966](#)).

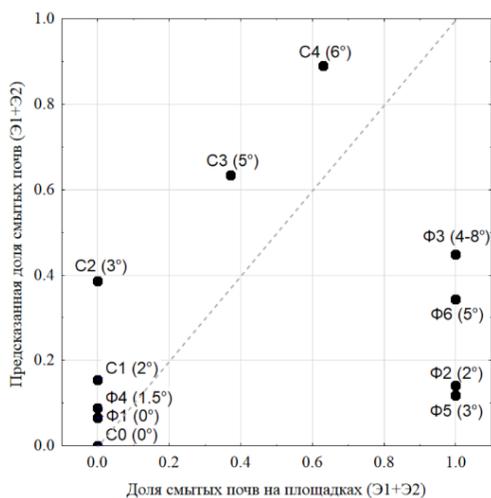


Рис. 7. Сопоставление участия смытых почв (Э1 + Э2) в составе почвенных комбинаций: фактического, установленное по материалам детальной почвенной съемки (ось X), и прогнозного, полученного при эрозионном моделировании (ось Y). C0–C4 – участки из работы [Н.П. Сорокиной \(1976\)](#); Ф1–Ф6 – участки из работы [М.И. Фишмана \(1971, 1977\)](#). В скобках указана крутизна вмещающего элемента мезорельефа.

Fig. 7. Comparison of the participation of eroded soils (Э1 + Э2) in the composition of the soils combinations: actual, revealed on the basis of detailed soil survey materials (X-axis), and predicted, obtained by erosion modeling (Y-axis). C0–C4 – adapted from the work of [N.P. Sorokina \(1976\)](#); Ф1–Ф6 – adapted from the work of [M.I. Fishman \(1971, 1977\)](#). The steepness of mesorelief element is indicated in brackets.

На площадках Н.П. Сорокиной диагностика смытых почв аналогична критериям, принятым в данном исследовании ([Научные основы..., 2013](#)). Показательно, что на склоновых площадках разных авторов прогнозная доля смытых почв растет по мере увеличения их крутизны независимо от принятых критериев смытости черноземов.

Вместе с тем проведенное сравнение демонстрирует неполное соответствие эрозионной модели фактическому проявлению водной эрозии. Принимая условность понятия “фактическое проявление эрозии” в свете известной метакронности этого явления ([Голосов и др., 2011](#); [Жидкин и др., 2015](#)), дальнейшее развитие

эрозионного моделирования структуры почвенного покрова склонов помимо учета талой эрозии ([Методические указания..., 1989](#); [Сухановский, 2013](#)) должно включать детализацию расчетов в связи с особенностями истории землепользования и других входных параметров; дальнейшее совершенствование критериев почвенно-морфологической диагностики эродированности почв; верификацию эрозионной модели на основе сопоставления расчетных темпов с данными других методов количественных оценок эрозионно-аккумулятивных процессов (изотопного и магнитного трассеров).

Развитие последней группы методов особенно важно для диагностики намывтых и смыто-намывтых почв как неотъемлемых компонентов эрозионных почвенных комбинаций (рис. 2). В данном исследовании ареал земель с намывтыми почвами определен как область расчетной аккумуляции наносов с интенсивностью выше $3 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ (рис. 3). Для более дифференцированного описания их участия в составе почвенного покрова склонов (рис. 4а) необходимой повторности описаний намывтых почв оказалось недостаточно.

После преодоления ряда методических ограничений предложенный подход к цифровому моделированию эрозионно-аккумулятивных структур почвенного покрова позволит формализовать оценку рисков агрогенной деградации склоновых земель при сложившейся практике их хозяйственного использования в сравнении с противоэрозионными рекомендациями внутрихозяйственного землеустройства и адаптивно-ландшафтного земледелия. Отечественные разработки советского периода не получили развития, в то время как их зарубежные аналоги (RUSLE2, WEPP – the Water Erosion Prediction Project и др.) активно используются при проектировании комплекса организационно-хозяйственных, агротехнических, лесомелиоративных и гидротехнических противоэрозионных мероприятий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена оригинальная методика цифрового картографирования эрозионной деградации пахотных земель. Показателем деградации служит компонентный состав структуры почвенного

покрова склонов. Скорость его эрозионной трансформации регионально специфична и зависит от интенсивности водной эрозии и генетических особенностей почвообразования. С учетом этого картографирование состава эрозионных ПК основано на сопоставлении расчетных темпов смыва со встречаемостью почв эрозионно-аккумулятивного ряда (рис. 4а) по элементам регулярной сетки при условии, что средние размеры их ареала меньше шага сетки (рис. 2). Соотношение почв в составе эрозионных ПК меняется от низких к высоким темпам смыва (рис. 4б) и поддается вероятностной оценке на всем интервале расчетных темпов эрозии (рис. 4в). Сравнительный анализ условных вероятностей участия эродированных почв в составе ПК в зависимости от величины смыва (рис. 5а, 5б) позволяет для каждого пикселя получить: 1) наиболее вероятную (преобладающую по площади) почвенную категорию (рис. 5в); 2) степень пестроты компонентного состава ПК (рис. 5г); 3) типы сочетаний преобладающей почвенной категории с сопутствующими (рис. 6).

Состоятельность предложенного подхода демонстрируется в региональных условиях северной лесостепи Среднерусской возвышенности (рис. 1). При расчете среднегодового смыва черноземов использована модель WaTEM/SEDEM, учитывающая взаимодействие между эрозионным потенциалом дождевых осадков, эродируемостью почв, эрозионным индексом возделываемых культур в среднегодовом севообороте и особенностями рельефа. При заданных входных параметрах эрозионной модели качественные изменения в структуре почвенного покрова (доля слабосмытых почв более 10%) начинаются с порогового значения водной эрозии $8 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$. При среднегодовой эрозии $30 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ доля смытых почв превышает 50%. В интервале значений смыва $32\text{--}52 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ в составе почвенных комбинаций преобладают слабосмытые почвы, а начиная с $52 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ – среднесмытые почвы.

Полученные карты корректно отражают региональное разнообразие и конфигурацию эрозионных почвенных комбинаций склонов. Суммарно эрозионно-зональные и эродированные группы ПК занимают 36% массива пашни. Вместе с тем наблюдается существенное расхождение компонентного состава эрозионных

ПК отдельных склонов, полученных по модели и в ходе детальной почвенной съемки (рис. 7). Это свидетельствует о необходимости дальнейшего развития имитационных моделей водной эрозии, в частности, учета в эрозионной модели талой эрозии и детализации расчетов в связи с особенностями истории землепользования и других входных параметров по каждому полю. Данная статья демонстрирует принципиальную возможность согласования расчетных темпов эрозии с компонентным составом эрозионных почвенных комбинаций.

Разработанный подход представляется перспективным для решения фундаментальных и прикладных задач, связанных с изучением структурно-функциональной организации почвенного покрова склонов и проектированием противоэрозионных мероприятий в адаптивно-ландшафтном земледелии.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы посвящают эту работу памяти Н.П. Сорокиной, определившей направление исследования, и благодарят М.М. Клещенко за помощь в проведении расчетов водной эрозии в модели WaTEM/SEDEM. Исследование выполнено при поддержке РФФИ, проект № 17-04-02217 (Козлов Д.Н., Лозбенев Н.И., методология и содержание исследования, сбор и анализ данных) и проект 18-35-20011 (Жидкин А.П., региональная параметризация эрозионной модели WaTEM/SEDEM).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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
2. 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.
3. Голосов В.Н., Беляев В.Р., Маркелов М.В., Шамигурина Е.Н. Особенности перераспределения наносов на малом водосборе за различные периоды его сельскохозяйственного освоения (водосбор Грачева

- лощина, Курская область) // Геоморфология. 2012. № 1. С. 25–35.
4. *Жидкин А.П., Голосов В.Н., Светличный А.А., Пяткова А.В.* Количественная оценка перераспределения наносов на пахотных склонах на основе использования полевых методов и математических моделей // Геоморфология. 2015. № 2. С. 41–53
5. *Козлов Д.Н., Лозбенев Н.И., Левченко Е.А.* Структурно-функциональная организация водно-миграционных и эрозионно-аккумулятивных комплексов лесостепи Среднерусской возвышенности // *Ландшафтоведение: теория, методы, ландшафтно-экологическое обеспечение природопользования и устойчивого развития: материалы XII Международной ландшафтной конференции.* Тюмень: Изд-во Тюменского гос. ун-та, 2017. С. 71–76.
6. *Кирюшин В.И.* Теория адаптивно-ландшафтного земледелия и проектирования агроландшафтов. М.: КолоС, 2011. 443 с.
7. *Клещенко М.М.* Формирование эрозионных почвенных комбинаций в ареалах дерново-подзолистых и черноземных почв (сравнение экспериментальных и модельных данных) // *Материалы Международной научной конференции XVIII Докучаевские молодежные чтения “Деградация почв и продовольственная безопасность России”.* СПб: Издательский дом СПбГУ, 2015. С. 157–158.
8. *Клещенко М.М., Козлов Д.Н., Сорокина Н.П.* Закономерности формирования эрозионных почвенных комбинаций лесостепи Среднерусской возвышенности и их картографирование с использованием почвенно-морфологического и расчетного методов // *Почвоведение – продовольственной и экологической безопасности страны: тезисы докладов VII съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева и Всероссийской с международным участием научной конференции.* Ч. II. М. – Белгород: Издательский дом “Белгород”, 2016. С. 422–423.
9. *Кузнецов М.С., Гендугов В.М., Дубин В.Н.* Допустимые потери почвы при эрозии и скорость гумусообразования // *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева.* 2002. Вып. 56. С. 50–58.
10. *Ларионов Г.А.* Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1993. 200 с.
11. *Литвин Л.Ф.* География эрозии почв сельскохозяйственных земель России. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2002. 255 с.
12. Методическое пособие и нормативные материалы для разработки адаптивно-ландшафтных систем земледелия. Курск: ЧуДо, 2001. 260 с.
13. Методические рекомендации по проектированию комплекса противозерозионных мероприятий на расчетной основе / Д.Е. Ванин, Г.П. Сурмач и др. Курск, 1985. 167 с.

14. Методические указания по проектированию противозерозионной организации территории при внутрхозяйственном землеустройстве в зонах проявления эрозии / Карцев Г.А., Лука А.Н., Носов С.И. и др. М., 1989. 79 с.
15. *Мирихулава Ц.Е.* Водная эрозия почв (механизм, прогноз). Тбилиси: “Мецниереба”, 2000. С. 3–421.
16. Научные основы предотвращения деградации почв (земель) сельскохозяйственных угодий России и формирования систем воспроизводства их плодородия в адаптивно-ландшафтном земледелии: Т. 1. Теоретические и методические основы предотвращения деградации почв (земель) сельскохозяйственных угодий. Коллективная монография. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии, 2013. 756 с.
17. Общесоюзная инструкция по почвенным обследованиям и составлению крупномасштабных почвенных карт землепользований. М.: Колос, 1973. 48 с.
18. Почвенная карта Курской государственной сельскохозяйственной опытной станции М 1 : 10 000, ред. В.А. Носин. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 1965.
19. *Рожков В.А.* Оценка эрозионной опасности почв // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2007. Вып. 59. С. 77–91. DOI: [10.19047/0136-1694-2007-59-77-91](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2007-59-77-91).
20. *Светличный А.А., Черный С.Г., Швобс Г.И.* Эрозиоведение: теоретические и прикладные аспекты. Сумы: ИТД “Университетская книга”, 2004. 410 с.
21. *Смирнова Л.Г., Нарожняя А.Г., Шамарданова Е.Ю.* Сравнение двух методов расчета смыва почвы на водосборах с применением ГИС-технологий // Достижения науки и техники АПК. 2012. № 9. С. 10–12.
22. *Сорокина Н.П.* Статистический метод оценки смывости на примере мощных типичных черноземов Курской опытной станции // Почвоведение. 1966. № 2. С. 91–96.
23. *Сорокина Н.П.* Элементарные почвенные структуры на полях Курской опытной станции. // Крупномасштабная картография почв и ее значение в сельском хозяйстве черноземной зоны. Науч. тр. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. М., 1976. С. 155–173.
24. *Сорокина Н.П.* Динамика ПП распаханного склона Курской опытной станции за 20-летний период // Региональные модели плодородия почв как основа совершенствования зональных систем земледелия. М., 1988. С. 163–171.
25. *Сорокина Н.П.* Принципы типизации почвенных комбинаций при изучении агрогенных изменений почвенного покрова // Почвоведение. 2005. № 12. С. 1477–1488.

26. *Сурмач Г.П.* Рельефообразование, формирование лесостепи, современная эрозия и противозерозийные мероприятия. Волгоград, 1992. 172 с.
27. *Сухановский Ю.П.* Модель дождевой эрозии почв // Почвоведение. 2010. № 9. С. 1114–1125
28. *Сухановский Ю.П.* Вероятностный подход к расчету эрозионных потерь почвы // Почвоведение. 2013. № 4. С. 474–481.
29. *Тишкина Э.В., Иванова Н.Н.* Почвенный покров распаханых и целинных прибалочных склонов (Курская область) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2010. № 6. С. 73–79.
30. *Фишман М.И.* Запасы гумуса в микрокомбинациях почвенного покрова лесостепи Среднерусской возвышенности // Почвоведение. 1971. № 11. С. 20–30.
31. *Фишман М.И.* Черноземные комплексы и их связь с рельефом на Среднерусской возвышенности // Почвоведение. 1977. № 5. С. 17–30.
32. *Фридланд В.М., Глазовская М.А.* Основные формы структур почвенного покрова Земли // Природа. 1979. № 11. С. 61–69
33. *Целищева Л.К., Дайнеко Е.К.* Очерк почв Стрелецкого участка Центрально-черноземного заповедника // Труды Центрально-черноземного государственного заповедника имени В.В. Алексина. 1966. Вып. 10.
34. *Beff L., Gunther T. Vandoorne B., Couvreur V., Javaux M.* Three-dimensional monitoring of soil water content in a maize field using Electrical Resistivity Tomography // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2013. Vol. 17. Iss. 2. P. 595–609. DOI: [10.5194/hess-17-595-2013](https://doi.org/10.5194/hess-17-595-2013).
35. *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-Science Reviews. 2013. Vol. 127. P. 16–29.
36. *Dhami, B.S., Pandey, A.* Comparative review of recently developed hydrologic models // J. Indian Water Resour. Soc. 2013. Vol. 33. No. 3. P. 34–41.
37. *Eltner A., Baumgart P., Maas H.-G., Faust D.* Multi-temporal UAV data for automatic measurement of rill and interrill erosion on loess soil // Earth Surface Processes and Landforms. 2014. Vol. 40. Iss. 6. P. 741–755. DOI: [10.1002/esp.3673](https://doi.org/10.1002/esp.3673).
38. *Florinsky I.V.* Digital terrain analysis in soil science and geology. Amsterdam: Elsevier, Academic Press, 2016. 506 p.
39. *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. Vol. 239. P. 160–173.

40. Golden H.E., Lane C.R., Amatya D.M., Bandilla K.W., Hadas R.K., Knightes C.D., Ssegane H. Hydrologic connectivity between geographically isolated wetlands and surface water systems: A review of select modeling methods // *Environmental Modelling & Software*. 2014. Vol. 53. P. 190–206.
41. Karydas C.G., Panagos P., Gitas I.Z. A classification of water erosion models according to their geospatial characteristics // *Digital Earth*. 2014. Vol. 7. Iss. 3. P. 229–250. DOI: [10.1080/17538947.2012.671380](https://doi.org/10.1080/17538947.2012.671380).
42. Kozlov D.N., Levchenko E.A., Lozbenev N.I. Soil combinations as an object of DSM: a case study in chernozems area of the Russian Plain. In: Arruays D., Savin I., Leenaars J., McBratney A. (Eds.), *GlobalSoilMap – Digital Soil Mapping from Country to Globe*. London: CRC Press, 2018. P. 81–88.
43. Minasny B., McBratney A. Digital soil mapping: A brief history and some lessons // *Geoderma*. 2016. Vol. 264. Part B. P. 301–311.
44. Panagos P., Borrelli P., Poesen J. et al. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe // *Environmental Science & Policy*. 2015. Vol. 54. P. 438–447. DOI: [10.1016/j.envsci.2015.08.012](https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012).
45. Panagos P., Borrelli P., Meusburger K. et al. Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records // *Sci Rep*. 2017. 7 (1):4175. DOI: [10.1038/s41598-017-04282-8](https://doi.org/10.1038/s41598-017-04282-8).
46. Pandey A., Himanshu S.K., Mishra S.K., Singh V.P. Physically based soil erosion and sediment yield models revisited // *Catena*. 2016. Vol. 147. P. 595–620.
47. Renard K., Foster G., Weesies G., McCool D., Yoder D. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). USDA Agriculture Handbook. 1997. 384 p. URL: https://www.ars.usda.gov/ARSEUserFiles/64080530/rusle/ah_703.pdf.
48. Revised Universal Soil Loss Equation Version 2 (RUSLE2). User's reference guide // USDA-Agricultural Research Service. 2008. 430 p. URL: http://fargo.nserl.purdue.edu/rusle2_dataweb/userguide/RUSLE2_User_Ref_Guide_2008.pdf.
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. Vol. 15. Iss. 6. P. 577–589. DOI: [10.1023/A:1008198215674](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. Vol. 26. Iss. 11. P. 1221–1236.
51. Verstraeten G., Van Oost K., Van Rompaey A., Poesen J., Govers G. Evaluating an integrated approach to catchment management to reduce soil loss and sediment pollution through modelling // *Soil Use and Management*. 2002. Vol. 18. P. 386–394.

REFERENCES

1. Barabanov A.T., Dolgov S.V., Koronkevich N.I., Panov V.I., Petel'ko A.I., Poverkhnostnyy stok i infil'tratsiya v pochvu talykh vod na pashne v lesostepnoy i stepnoy zonakh Vostochno-evropeyskoy ravniny (Surface runoff and melt water infiltration on arable land in the forest-steppe and steppe zones of the East European Plain), *Pochvovedenie*, 2018, No. 1, pp. 62–69
2. Golosov V.N., Gennadiev A.N., Olson K.R., Markelov M.V., Zhidkin A.P., Chendev Yu.G., Kovach R.G., Prostranstvenno-vremennye osobennosti razvitiya pochvenno-erozionnykh protsessov v lesostepnoy zone Vostochno-Evropeyskoy ravniny (Spatial-temporal features of the development of soil-erosion processes in the forest-steppe zone of the East European Plain), *Pochvovedenie*, 2011, No. 7, pp. 861–869.
3. Golosov V.N., Belyaev V.R., Markelov M.V., Shamshurina E.N., Osobennosti pereraspredeleniya nanosov na malom vodosbore za razlichnye periody ego zemledel'cheskogo osvoeniya (vodobor Gracheva loshchina, Kurskaya oblast') (Peculiarities of sediment redistribution at a small catchment for different periods of its agricultural development (catchment Gracheva hollow, Kursk region)), *Geomorfologiya*, 2012, No. 1, pp. 25–35.
4. Zhidkin A.P., Golosov V.N., Svetlichnyy A.A., Pyatkova A.V., Kolichestvennaya otsenka pereraspredeleniya nanosov na pakhotnykh sklonakh na osnove ispol'zovaniya polevykh metodov i matematicheskikh modeley (Quantitative assessment of sediment redistribution on arable slopes based on the use of field methods and mathematical models), *Geomorfologiya*, 2015, No. 2, pp. 41–53.
5. Kozlov D.N., Lozbenov N.I., Levchenko E.A., Strukturno-funktsional'naya organizatsiya vodno-migratsionnykh i erozionno-akkumulyativnykh kompleksov lesostepi Srednerusskoy vozvyshennosti, *Landshaftovedenie: teoriya, metody, landshaftno-ekologicheskoe obespechenie prirodopol'zovaniya i ustoychivogo razvitiya: materialy XII Mezhdunarodnoy landshaftnoy konferentsii* (Landscape Science: Theory, Methods, Landscape-Environmental Support for Nature Management and Sustainable Development: Proc. XII Int. Landscape Conf.), Tyumen': Izd-vo Tyumenskogo gos. un-ta, 2017, pp. 71–76.
6. Kiryushin V.I. *Teoriya adaptivno-landshaftnogo zemledeliya i proektirovaniya agrolandshaftov* (The theory of adaptive landscape farming and the design of agrolandscapes), Moscow: KoloS, 2011, 443 p.
7. Kleshchenko M.M., Formirovanie erozionnykh pochvennykh kombinatsiy v arealakh dernovo-podzolistykh i chernozemnykh pochv (sravnenie eksperimental'nykh i model'nykh dannyykh) (Formation of erosion soil combinations in the areas of sod-podzolic and chernozem soils (comparison of

experimental and model data)), *Materialy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii XVIII Dokuchaevskie molodezhnye chteniya "Degradatsiya pochv i prodovol'stvennaya bezopasnost' Rossii"* (Proc. Int. Sci. Conf. – XVIII Dokuchaev youth readings "Soil degradation and food security of Russia"), St. Petersburg: Izdatel'skiy dom SPbGU, 2015, pp. 157–158.

8. Kleshchenko M.M., Kozlov D.N., Sorokina N.P., *Zakonomernosti formirovaniya erozionnykh pochvennykh kombinatsiy lesostepi Srednerusskoy vozvyshennosti i ikh kartografirovanie s ispol'zovaniem pochvenno-morfologicheskogo i raschetnogo metodov* (Patterns of formation of erosive soil combinations of the forest-steppe of the Central Russian Upland and their mapping using soil-morphological and calculation methods), In: *Pochvovedenie – prodovol'stvennoy i ekologicheskoy bezopasnosti strany: tezisy dokladov VII s'ezda Obshchestva pochvovedov im. V.V. Dokuchaeva i Vserossiyskoy s mezhdunarodnym uchastiem nauchnoy konferentsii* (Soil Science – Food and Environmental Safety of the Country: Proc. VII Congress of the Society of Soil Scientists named after V.V. Dokuchaev and the All-Russian Sci. Conf. with international participation), Part. II, Moscow – Belgorod: Izdatel'skiy dom "Belgorod", 2016, pp. 422–423.

9. Kuznetsov M.S., Gendugov V.M., Dubin V.N., *Dopustimye poteri pochvy pri erozii i skorost' gumusobrazovaniya* (Permissible soil loss during erosion and the rate of humus formation), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2002, Vol. 56, pp. 50–58.

10. Larionov G.A., *Eroziya i deflyatsiya pochv: osnovnye zakonomernosti i kolichestvennye otsenki* (Soil erosion and deflation: basic patterns and quantitative estimates.), Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 1993, 200 p.

11. Litvin L.F., *Geografiya erozii pochv sel'skokhozyaystvennykh zemel' Rossii* (Geography of soil erosion on agricultural land in Russia), Moscow: IKTs "Akademkniga", 2002, 255 p.

12. *Metodicheskoe posobie i normativnye materialy dlya razrabotki adaptivno-landshaftnykh sistem zemledeliya* (Methodological manual and standards for developing adaptive landscape farming systems), Kursk: ChuDo, 2001, 260 p.

13. Vanin D.E., Surmach G.P. (Eds), *Metodicheskie rekomendatsii po proektirovaniyu kompleksa protiverozionnykh meropriyatiy na raschetnoy osnove* (Guidelines for the design of a set of erosion control measures on a calculated basis), Kursk, 1985, 167 p.

14. Kartsev G.A., Luka A.N., Nosov S.I. (Eds), *Metodicheskie ukazaniya po proektirovaniyu protiverozionnoy organizatsii territorii pri vnutrikhozyaystvennom zemleustroytve v zonakh proyavleniya erozii* (Methodical guidelines for the design of erosion control organization of the territory in intra-farm land management in zones of erosion manifestation),

Moscow, 1989, 79 p.

15. Mirtskhulava Ts.E., *Vodnaya eroziya pochv (mekhanizm, prognoz)* (Water erosion of soils (mechanism, prognosing)), Tbilisi: "Metsniereba", 2000, pp. 3–421.

16. *Nauchnye osnovy predotvrashcheniya degradatsii pochv (zemel') sel'skokhozyaystvennykh ugodiy Rossii i formirovaniya sistem vosproizvodstva ikh plodorodiya v adaptivno-landshaftnom zemledelii*: Т. 1. Teoreticheskie i metodicheskie osnovy predotvrashcheniya degradatsii pochv (zemel') sel'skokhozyaystvennykh ugodiy (Scientific basis for the prevention of the soil (land) degradation in agricultural lands of Russia and the formation of the reproduction systems of their fertility in adaptive and landscape farming: Vol. 1. Theoretical and methodological basis for the prevention of the soil (land) degradation in agricultural lands), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute RAS, 2013, 756 p.

17. *Obshchesoyuznaya instruktsiya po pochvennym obsledovaniyam i sostavleniyu krupnomasshtabnykh pochvennykh kart zemlepol'zovaniy* (All-Union instruction on soil surveys and development of large-scale land use soil maps), Moscow: Kolos, 1973, 48 p.

18. Nosin V.A. (Ed.), *Soil map of the Kursk State Agricultural Experimental Station M 1 : 10 000*, Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 1965.

19. Rozhkov V.A., Otsenka erozionnoy opasnosti pochv (Erosion hazard assessment of soils), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2007, Vol. 59, pp. 77–91, DOI: [10.19047/0136-1694-2007-59-77-91](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2007-59-77-91).

20. Svetlichnyy A.A., Chernyy S.G., Shvebs G.I., *Eroziovedenie: teoreticheskie i prikladnye aspekty* (Erosion studies: theoretical and applied aspects), Sumy: ITD "Universitetskaya kniga", 2004, 410 p.

21. Smirnova L.G., Narozhnyaya A.G., Shamardanova E.Yu., Sravnenie dvukh metodov rascheta smyva pochvy na vodosborakh s primeneniem GIS-tekhnologiy (Comparison of two methods for calculating soil losses on watersheds using GIS technologies), *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 2012, No. 9, pp. 10–12.

22. Sorokina N.P., Statisticheskiy metod otsenki smytosti na primere moshchnykh tipichnykh chernozemov Kurskoy opytной stantsii (A statistical method for assessing erosion degradation by the example of deep typical chernozems of the Kursk experimental station), *Pochvovedenie*, 1966, No. 2, pp. 91–96.

23. Sorokina N.P., Elementarnye pochvennye struktury na polyakh Kurskoy opytной stantsii (Elementary soil structures in the fields of the Kursk experimental station.), In: *Krupnomasshtabnaya kartografiya pochv i ee znachenie v sel'skom khozyaystve chernozemnoy zony. Nauch. tr. Pochv. in-ta im. V.V. Dokuchaeva* (Large-scale cartography of soils and its significance in

the agriculture of the chernozem zone. Scientific Works of V.V. Dokuchaev Soil Science Institute), Moscow, 1976, pp. 155–173.

24. Sorokina N.P., Dinamika PP raspakhannogo sklona Kurskoy opytной stantsii za 20-letniy period (The dynamics of the plowed slope of the Kursk experimental station over a 20-year period), In: *Regional'nye modeli plodorodiya pochv kak osnova sovershenstvovaniya zonal'nykh sistem zemledeliya* (Regional soil fertility models as the basis for improving zonal farming systems), Moscow, 1988, pp. 163–171.

25. Sorokina N.P., Printsipy tipizatsii pochvennykh kombinatsiy pri izuchenii agrogennykh izmeneniy pochvennogo pokrova (The principles of typification of soil combinations in the study of agrogenic changes in soil cover), *Pochvovedenie*, 2005, No. 12, pp. 1477–1488.

26. Surmach G.P., *Rel'efoobrazovanie, formirovanie lesostepi, sovremennaya eroziya i protiverozionnyye meropriyatiya* (Relief formation, forest-steppe formation, modern erosion and erosion control measures), Volgograd, 1992, 172 p.

27. Sukhanovskiy Yu.P., Model' dozhdevoy erozii pochv (Model of soil rain erosion), *Pochvovedenie*, 2010, No. 9, pp. 1114–1125.

28. Sukhanovskiy Yu.P., Veroyatnostnyy podkhod k raschetu erozionnykh poter' pochvy (A probabilistic approach to the calculation of soil erosion losses), *Pochvovedenie*, 2013, No. 4, pp. 474–481.

29. Tishkina E.V., Ivanova N.N., Pochvennyy pokrov raspakhannykh i tselinnykh pribalochnykh sklonov (Kurskaya oblast') (Soil cover of the plowed and virgin snowboard slopes (Kursk region)), *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geografiya*, 2010, No. 6, pp. 73–79.

30. Fishman M.I., Zapasy gumusa v mikro kombinatsiyakh pochvennogo pokrova lesostepi Srednerusskoy vozvysheynosti (Humus reserves in microcombinations of the soil cover of the forest-steppe of the Central Russian Upland), *Pochvovedenie*, 1971, No. 11, pp. 20–30.

31. Fishman M.I., Chernozemnyye komplekсы i ikh svyaz' s rel'efom na Srednerusskoy vozvysheynosti (Black soil complexes and their relationship with the relief on the Central Russian Upland), *Pochvovedenie*, 1977, No. 5, pp. 17–30.

32. Fridland V.M., Glazovskaya M.A., Osnovnyye formy struktur pochvennogo pokrova Zemli (The main forms of soil cover of the Earth), *Priroda*, 1979, No. 11, pp. 61–69.

33. Tselishcheva L.K., Dayneko E.K., Oчерк pochv Streletskogo uchastka Tsentral'no-chernozemnogo zapovednika (Soil sketch of the Streletsky section of the Central Black Earth Reserve), In: *Trudy Tsentral'no-chernozemnogo gosudarstvennogo zapovednika imeni V.V. Alekhina* (Works of the Central Black Earth State Reserve named after V.V. Alekhine.), 1966, Iss. 10.

34. Beff L., Gunther T., Vandoorne B., Couvreur V., Javaux M., Three-dimensional monitoring of soil water content in a maize field using Electrical Resistivity Tomography, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2013, Vol. 17, Iss. 2, pp. 595–609. DOI: [10.5194/hess-17-595-2013](https://doi.org/10.5194/hess-17-595-2013).
35. 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-Science Reviews*, 2013, Vol. 127, pp. 16–29.
36. Dhami B.S., Pandey A., Comparative review of recently developed hydrologic models, *J. Indian Water Resour. Soc.*, 2013, Vol. 33, No. 3, pp. 34–41.
37. Eltner A., Baumgart P., Maas H.-G., Faust D., Multi-temporal UAV data for automatic measurement of rill and interrill erosion on loess soil, *Earth Surface Processes and Landforms*, 2014, Vol. 40, Iss. 6, pp. 741–755, DOI: [10.1002/esp.3673](https://doi.org/10.1002/esp.3673).
38. Florinsky I.V., *Digital terrain analysis in soil science and geology*, Amsterdam: Elsevier, Academic Press, 2016, 506 p.
39. 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, Vol. 239, pp. 160–173.
40. Golden H.E., Lane C.R., Amatya D.M., Bandilla K.W., Hadas R.K., Knightes C.D., Ssegane H., Hydrologic connectivity between geographically isolated wetlands and surface water systems: A review of select modeling methods, *Environmental Modelling & Software*, 2014, Vol. 53, pp. 190–206.
41. Karydas C.G., Panagos P., Gitas I.Z., A classification of water erosion models according to their geospatial characteristics, *Digital Earth*, 2014, Vol. 7, Iss. 3, pp. 229–250, DOI: [10.1080/17538947.2012.671380](https://doi.org/10.1080/17538947.2012.671380).
42. Kozlov D.N., Levchenko E.A., Lozbenov N.I., Soil combinations as an object of DSM: a case study in chernozems area of the Russian Plain. In: Arrouays D., Savin I., Leenaars J., McBratney A. (Eds.), *GlobalSoilMap – Digital Soil Mapping from Country to Globe*, London: CRC Press, 2018, pp. 81–88.
43. Minasny B., McBratney A., Digital soil mapping: A brief history and some lessons, *Geoderma*, 2016, Vol. 264, Part B, pp. 301–311.
44. Panagos P., Borrelli P., Poesen J. et al., The new assessment of soil loss by water erosion in Europe, *Environmental Science & Policy*, 2015, Vol. 54, pp. 438–447, DOI: [10.1016/j.envsci.2015.08.012](https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012).
45. Panagos P., Borrelli P., Meusburger K. et al., Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records, *Sci Rep.*, 2017, 7 (1):4175, DOI: [10.1038/s41598-017-04282-8](https://doi.org/10.1038/s41598-017-04282-8).
46. Pandey A., Himanshu S.K., Mishra S.K., Singh V.P., Physically based soil

erosion and sediment yield models revisited, *Catena*, 2016, Vol. 147, pp. 595–620.

47. Renard K., Foster G., Weesies G., McCool D., Yoder D., Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), *USDA Agriculture Handbook*, 1997, 384 p. URL: https://www.ars.usda.gov/ARUserFiles/64080530/rusle/ah_703.pdf.

48. Revised Universal Soil Loss Equation Version 2 (RUSLE2). User's reference guide, *USDA-Agricultural Research Service*, 2008, 430 p., URL: http://fargo.nserl.purdue.edu/rusle2_dataweb/userguide/RUSLE2_User_Ref_Guide_2008.pdf.

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, Vol. 15, Iss. 6, pp. 577–589, DOI: [10.1023/A:1008198215674](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, Vol. 26, Iss. 11, pp. 1221–1236.

51. Verstraeten G, Van Oost K, Van Rompaey A, Poesen J., Govers G., Evaluating an integrated approach to catchment management to reduce soil loss and sediment pollution through modelling, *Soil Use and Management*, 2002, Vol. 18, pp. 386–394.