



УДК 631.471
DOI 10.52575/2712-7443-2025-49-3-548-560
EDN SBFZUV

Сравнительная оценка моделей определения поверхностного смыва почв (на уровне речного бассейна)

Григорьева О.И.

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85
grigoreva_o@bsuedu.ru

Аннотация. При оценке процессов водной эрозии, которая необходима для противоэрозионной организации территории агроландшафтов, в Российской Федерации и в зарубежной практике используют широкий набор эмпирических и физически обоснованных моделей, исходя из их концептуального назначения. Несмотря на значительное количество предложений по расчету смыва почв, в России не утверждена единая модель для вычисления почвенных потерь, также не проведено сопоставление расчетных значений. Целью данного исследования является сравнительная (расчетная по моделям) оценка среднегодовых почвенных потерь от ливневых осадков для пахотных земель. Исследование проведено для территории бассейна реки Сейм Губкинского района Белгородской области. Потенциальные почвенные потери рассчитаны по наиболее распространенным эрозионным моделям. Расчет факторов эрозии осуществлен с применением технологий пространственного анализа с использованием геоинформационных систем (*ArcGIS*, *QGIS*). Выполненные оценки по одной и той же территории, но разными методами потенциальных почвенных потерь изменяются от 3,5–5,4 т/га до 6,0–7,0 т/га, что объясняется различными входными параметрами в формулах расчета, в частности значениями фактора рельефа, гидрофизических параметров и поправками на эродируемость почв.

Ключевые слова: поверхностный смыв, *USLE*, почвенные потери, геопропространственный анализ, водная эрозия почв

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания № FZWG-2023-0011.

Для цитирования: Григорьева О.И. 2025. Сравнительная оценка моделей определения поверхностного смыва почв (на уровне речного бассейна). Региональные геосистемы, 49(3): 548–560. DOI: 10.52575/2712-7443-2025-49-3-548-560 EDN: SBFZUV

Comparative Evaluation of Models for Determining Surface Soil Erosion (at the River Basin Level)

Olesya I. Grigoreva

Belgorod State National Research University,
85 Pobeda St, Belgorod 308015, Russia
grigoreva_o@bsuedu.ru

Abstract. In foreign practice, many empirical and physically based models are used to assess water erosion processes, which is necessary for organizing anti-erosion measures in agricultural areas. At the same time, there is no generally accepted model for calculating soil erosion in Russia, and no estimated values have been compared. This article presents the results of a comparative assessment of average annual soil losses caused by heavy rainfall in the arable lands of the Seym river basin in the Gubkinsky

© Григорьева О.И., 2025

district of the Belgorod Region. Potential soil losses were calculated using the most common erosion models. The calculation of erosion factors was carried out using spatial analysis technologies and geoinformation programs (*ArcGIS*, *QGIS*). During the study, we assessed potential soil losses in the same area using various methods. We found that average annual estimated values ranged from 3.5 t/ha to 7.0 t/ha, which is explained by differences in the input parameters in the calculation formulas, in particular, landscape specifics, hydrophysical parameters, and various degrees of soil erodibility.

Keywords: surface runoff, USLE, soil losses, geospatial analysis, soil erosion by water

Acknowledgements: This research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of State Assignment No. FZWG-2023-0011.

For citation: Grigoreva O.I. 2025. Comparative Evaluation of Models for Determining Surface Soil Erosion (at the River Basin Level). *Regional Geosystems*, 49(3): 548–560 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2025-49-3-548-560 EDN: SBFZUV

Введение

На протяжении многих лет проблеме развития эрозии почв уделяется огромное внимание как на международной арене, так и российскими учеными. Среди отечественных ученых значительный вклад в становление и развитие эрозиоведения внесли С.С. Соколов, Н.И. Маккавеев, М.Н. Заславский, Г.И. Швебс, Г.П. Сурмач, Г.А. Ларионов, М.С. Кузнецов, В.Н. Голосов, О.П. Ермолаев, А.П. Жидкин.

Благодаря значительному вкладу в многолетние исследования водной эрозии почв, были определены [Лисецкий и др., 2012] новые подходы к математическому моделированию эрозионных и почвообразовательных процессов, обоснованию рационального использования эрозионно опасных земель.

Эмпирические модели [Иванов, 1975; Сурмач, 1992] построены на зависимости смыва от слоя стока. Проведенная проверка этих данных показала, что эти модели сильно завышают смыв, а модель ГГИ дает заниженные результаты [Ларионов, 1993]. В модели ГГИ [Инструкция по определению..., 1979] не учитывается основной фактор эрозии – форма и длина склона, а также величина уклона. Г.А. Ларионов [1993] выделил основной недостаток модели ГГИ в том, что функция длины склона представлена в нечетко выраженном виде, тем самым исключая возможность использования ее для проектирования противоэрозионных мер, а замещение специального параметра – длины склона на параметры, зависящие от типа ручейковой сети, делает использование подобной формулы для противоэрозионного землеустройства весьма ограниченным [Лисецкий и др., 2012].

Вычисление объема смыва почвы на склонах сложной формы на основе универсального уравнения почв легло в основу расчета потери почвы со всего склона в практике противоэрозионного проектирования в бывшем Советском Союзе.

Оценка смыва эмпирическими формулами как средство аналитического обобщения количественных законов процесса является более совершенным приемом, учитывающий все основные факторы, применяемые при проектировании противоэрозионных мероприятий.

При решении задач землеустройства и выбора противоэрозионных мероприятий модель смыва должна отражать в явном виде определенный набор факторов. Учитывая, что фактор рельефа в эрозионных моделях является определяющим, различными авторами модифицировались формулы путем применения дополнений исходя из условий протекания опытного процесса и поставленных задач, аналитические записи рельефных функций принимали отличное от исходного выражение. Анализ вариантов рельефных функций, проведенный в работе [Лисецкий, Половинко, 2012], показал, что при длинных склонах, характерных в том числе и для агроландшафтов Белгородской области, близкие по значениям результаты показали формулы, предложенные [Wischmeier, Smith, 1978; Morgan, 1979; McCool, 1994].

Для условий ЦЧР также применима методика, разработанная коллективом авторов в лаборатории моделирования эрозионных процессов ВНИИЗиЗПЭ [Сухановский, Пискунов, 2007]. Как показывают многолетние опыты, применяемый в данной методике подход обеспечивает достаточную степень защиты почвенного покрова в сочетании с экономически целесообразными затратами на противоэрозионные мероприятия.

Проанализировав значимый объем многолетних исследований в области расчета смыва почв, автор приходит к выводу, что для решения задач, стоящих в настоящее время перед сектором управления агропромышленным комплексом, а именно – достижения продовольственной безопасности страны, а значит производства продукции растениеводства при одновременном сохранении (воспроизводстве) почвенного плодородия, подходит использование универсального уравнения почвенной эрозии США (*USLE*), адаптированного Г.А. Ларионовым для условий ЦФО, и уравнения расчета средней многолетней интенсивности ливневой эрозии [Герасименко, Кумани, 2000]. Для сравнения были осуществлены расчеты объема смыва почв по модели дождевой эрозии почв [Сухановский, Пискунов, 2007].

Учитывая, что при снеготаянии доля потерь почвы минимальна [Ларионов, 1993] и основной объем смытого с водосбора материала формируется в период ливневого стока [Голосов и др., 2022], в нашем исследовании мы взяли в работу только модули смыва ливневой эрозии.

Объект и методы исследования

Расчеты почвенных потерь производили на территорию бассейна реки Сейм в пределах Губкинского района Белгородской области (рис.1).

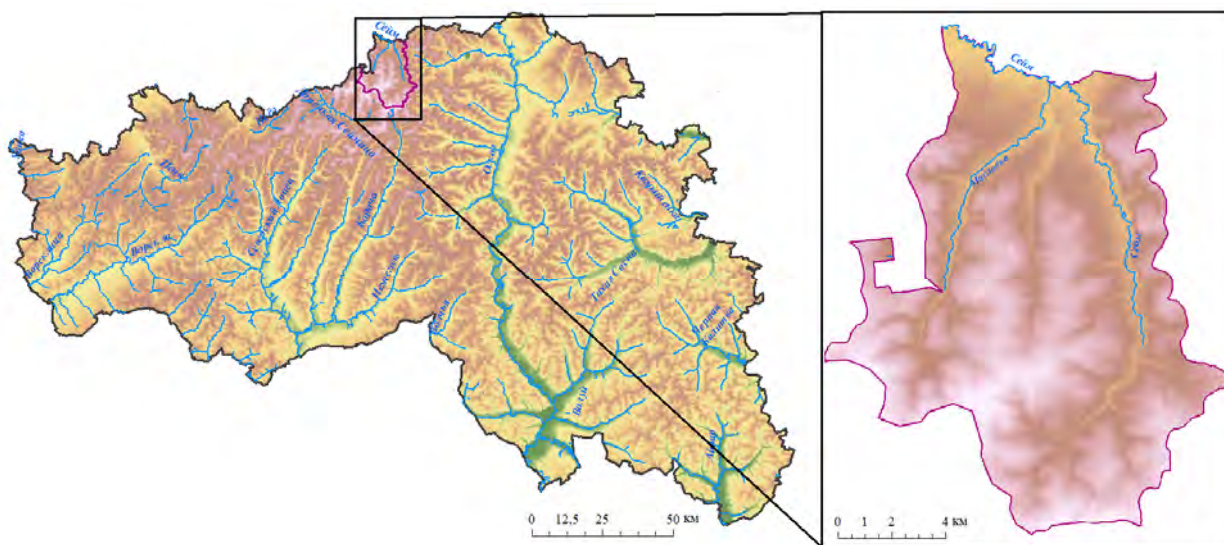


Рис. 1. Расположение бассейна реки Сейм в пределах Белгородской области

Fig. 1. Location of the Seym River basin in Belgorod region

Общая площадь бассейна в границах области составляет 27500 км², длина реки – 255,2 км, однако с конца XVIII в. она сократилась на 22 % [Лисецкий и др., 2012]. Сокращение речной сети связано прежде всего с резким уменьшением облесенности территории, поступлением в речную сеть наносов с распаханых водосборов и зарегулированием стока.

По результатам анализа крупномасштабной топокарты установлено, что наибольшую площадь бассейна занимают территории с уклоном менее 3°. Имеющиеся пашни на склонах более 5° необходимо учитывать при организации землеустроительных действий, направленных на решение проблем водной эрозии. Процессам эрозии подвержены 42 % почв пашни бассейна.

Ведущий сельскохозяйственный производитель на территории бассейна – ОАО «РусАгро» – имеет свекловично-зерновое направление. Применение на склоновых землях пропашных культур может привести к значительным почвенным потерям, поэтому очень важно организовать правильную концепцию противоэрозионных мероприятий, основанных на бассейновых принципах. На исследуемую территорию не были разработаны проекты бассейнового природопользования и, соответственно, не осуществлялась оценка экологического состояния агроландшафтов бассейна.

Таким образом, бассейн реки Сейм привлекателен для разработки научно обоснованного проекта бассейнового природопользования, содержащего меры по рациональному использованию земель, спроектированные на основе данных о количественном и территориальном определении почвенных потерь от водной эрозии.

При расчете эрозионных потерь почвы автором учтено существующее размещение лесопокрываемых территорий на пашне, так как под ними смыв практически отсутствует [Ермолаев, 1992].

Хорошо известное универсальное уравнение потерь почвы (*USLE*) использовано в виду того, что оно одно из наименее требовательных к составным факторам эрозии, которые были разработаны и широко применимы в различных масштабах. Хотя уравнение имеет много недостатков и ограничений, оно широко используется из-за своей относительной простоты и надежности [Desmet, Govers, 1996] и определяется по формуле [Wischmeier, Smith, 1978]:

$$W = 0,224R \times K \times LS \times C \times P, \quad (1)$$

где W – среднегодовые почвенные потери от ливневых осадков, т/га в год; R – эрозионный потенциал ливневых осадков максимальной 30-минутной интенсивности, усл. ед.; K – фактор эродированности почв, т/га на единицу эрозионного потенциала осадков; LS – фактор рельефа, усл. ед.; C – эрозионный индекс культуры или севооборота, усл. ед.; P – коэффициент почвозащитной эффективности противоэрозионной меры, усл. ед.

Эрозионный потенциал осадков R для формулы (1) рассчитан по формуле [Wischmeier, Smith, 1978; Renard et. al., 1997] как произведение кинетической энергии дождевых капель, выпавших за дождь на площади в один гектар, на 30-минутную максимальную интенсивность этого дождя. Значения R -фактора, представленного на геопортале «Речные бассейны Европейской России» [Геопортал..., 2025], были использованы для моделирования в данной работе.

Фактор эродированности почв K зависит от гранулометрического состава почвы, содержания гумуса, структуры и водопроницаемости почвы. K -фактор был рассчитан на основе параметров основных типов почв Белгородской области [Соловиченко, Тютюнов, 2013] по формуле [Wischmeier, Smith, 1978; Renard et. al., 1997]:

$$K = \{ [2.1 \times (Ms \times (100 - Mc))^{1.14} \times (10^{-4}) \times (12 - a)] + [3.25 \times (b - 2)] + [2.5 \times (c - 3)] \} / 100, \quad (2)$$

где Ms – содержание фракций 0,1–0,05 мм, %; Mc – содержание фракций < 0,05 мм, %; a – содержание гумуса, %; b – класс структуры почвы; c – класс водопроницаемости почвы.

Фактор рельефа LS рассчитывали по формуле [Wischmeier, Smith, 1978]:

$$LS = (L/72.6)^m \times [65.41 \times \sin^2(\alpha)] + (4.56 \times \sin(\alpha) + 0.065), \quad (3)$$

где L – длина склона, м; S – уклон, %; m – показатель степени, равный 0,2; 0,3; 0,4 и 0,5 при уклонах < 1; 1–3; 3–5 и > 5 %.

Коэффициент покрытия и рационального использования (C) определяется как отношение потерь почвы с участка, занятого растительным покровом к потерям почвы на поле, находящегося под паром [Wischmeier, Smith, 1978].



Для территории Белгородской области в работе [Буряк и др., 2023] рассчитан среднегодовой *C-фактор*, полученный по результатам дешифрирования посевных площадей с использованием среднегодовых значений вегетационного индекса *NDVI* с применением формулы:

$$C = \exp[\alpha \cdot (NDVI / \beta - NDVI)], \quad (4)$$

где α и β – безразмерные параметры, детерминирующие форму кривой *NDVI* по отношению к коэффициенту *C*, со значениями 2 и 1 соответственно.

При расчете среднегодовых почвенных потерь от ливневых осадков по формуле (1) мы не учитывали корректировку на средневзвешенный коэффициент *C*, введенный в работе [Буряк и др., 2023] и рассчитанный по данным структуры посевных площадей Белгородской области, так как сведения данной структуры рассчитаны как средние для районов значения, то применение этих поправок для расчета *C-фактора* в формуле (1) приводит к завышенным значениям среднегодовых почвенных потерь.

Коэффициент *P* в формуле (1) учитывает методы управления, которые влияют на эрозию почвы, такие как оконтуривание, террасирование [Renard et al., 1997]. Чем эффективнее природоохранные мероприятия по предотвращению эрозии почвы, тем ниже коэффициент *P* [Bagherzadeh, 2014]. Учитывая отсутствие четкой градации для определения коэффициента *P*, в своей работе мы применили значение, равное 1,0.

Несмотря на то, что коэффициент *P* обычно игнорируется в расчетах почвенных потерь, в ряде исследований сообщается о возможных коэффициентах *P* для различных видов обработки почвы [David, 1988.; Panagos et al., 2015]. Результаты наблюдений за стоком воды и наносов [Голосов, 2006] показали, что темпы смыва с зяби и озимых на ложбинно-потяжинных водосборах практически на порядок превышают темпы смыва на обычных водосборах. Таким образом, влияния коэффициентов *C* и *P* существенны и подлежат детальному изучению. При надлежащих масштабах и достаточном знании методов ведения сельского хозяйства использование этих коэффициентов может привести к более точной оценке почвенных потерь.

В результате получены значения среднегодового объема смыва почв в бассейне – 7,0 т/га, высокая эрозионная опасность наблюдается для склонов крутизной более 5° и величиной почвенных потерь – 11–13 т/га в год.

Применение адаптированной для условий Европейской России эмпирической модели для расчета среднегодовых почвенных потерь от ливневых осадков [Ларионов, 1993] на территорию Белгородской области показано в работе [Буряк и др., 2023]. Существенным отличием от универсального уравнения выступают фактор рельефа *LS*, а также фактор эродированности почв *K*. Фактор рельефа *LS*, рассчитанный по формуле [Ларионов и др., 1998], учитывает не только длину и уклон, но и форму склона, а также поправку на эродированность. В расчет фактора эродированности почв *K* по формуле (1), адаптированной для условий России [Ларионов и др., 1998], введены параметры, зависящие от каменистости и щебнистости почв. Расчеты с данными вариациями, составляющими универсальное уравнение, показали среднегодовую расчетную величину потенциальных почвенных потерь $3,5 \pm 0,3$ т/га [Буряк и др., 2023]. В этой же работе отмечено, что высокая эрозионная опасность характерна также для склонов крутизной более 5° и средней величиной почвенных потерь на таких землях, равной 13 т/га в год.

Методика расчета почвенных потерь от ливневой эрозии, предложенная коллективом авторов ВНИИЗиЗПЭ под руководством В.П. Герасименко, при которой среднегодовой объем почвенных потерь (т/га) рассчитывается как:

$$W = P \times i \times L \times \sin \alpha \times \pi \times S \times \lambda \times C \times K_n, \quad (6)$$

где *P* – коэффициент, зависящий от степени увлажнения территории, усл. ед.; *i* – 30 минутная интенсивность ливней 50 %-ной обеспеченности для территории опытных водо-

сборов, мм/мин; L – расстояние от водораздела до створа, для которого определяется смыв почвы, м; $\sin\alpha$ – синус угла наклона в радианах на расстоянии L от водораздела; π – коэффициент, учитывающий влияние на смыв профиля склона; S – показатель, характеризующий влияние типа (подтипа) почвы на эрозию; λ – коэффициент, отражающий влияние на эрозионные процессы степени эродированности пашни, усл. ед.; C – параметр, зависящий от вида агрофона в вегетационный период, усл. ед.; K_n – коэффициент снижения смыва применяемыми почвозащитными агротехническими или гидромелиоративными приемами на пашне, усл. ед.

Модель учитывает основные факторы, влияющие на эрозию, которые легко рассчитываются с применением блоков морфометрического и гидрологического анализа, а также алгебры карт геоинформационных программ *ArcGIS* и *QGIS*. В результате вычислений получены среднегодовые потенциальные почвенные потери с пашни в объеме 5,4 т/га. В данной модели, на наш взгляд, применение единого коэффициента агрофона (C) на всю территорию некорректно, так как отмечается высокое влияние данного коэффициента на величину смыва почвы.

Выше описаны решения по расчету объема смыва почв, осуществленные по эмпирическим моделям, основанным на универсальном или подобном ему уравнениях, а в качестве сравнения мы приведем расчет по гидрофизической модели, разработанной Ю.П. Сухановским и А.Н. Пискуновым. Данная модель выбрана по причине ее апробации на территории, смежной с исследуемой.

Уравнение отрыва почвенных частиц при выпадении единичного дождя имеет вид (7):

$$W = a_0 A_r (H - H_{cr})^{0.4} (M - M_{cr})^{0.6}, \quad (7)$$

$$A_r = C_1 R_{eff}^2 \frac{\rho_a D_a^{4/3} \sin \alpha^{7/10}}{V_{\Delta cr1}} * \left(\frac{m_k}{n} \right)^{7/5}, \quad (8)$$

где W – почвенные потери от ливневых осадков (кг/м²); a_0 – коэффициент, зависящий от гидрографа, усл. ед.; H – слой дождя, м; H_{cr} – слой дождя до начала стока, м; M – объем стока, нормированный на единицу ширины склона, м²; M_{cr} – критический объем стока, при котором начинается отрыв частиц, м²; R_{eff} – эффективный радиус воздействия удара капель на поверхностный поток, усл. ед.; ρ_a – средняя плотность отрывааемых частиц, кг/м³; D_a – средний диаметр отрывааемых частиц, м; α – угол наклона поверхности; $V_{\Delta cr1}$ – первая критическая скорость потока, м/сек; m_k – коэффициент, учитывающий ручейковый характер поверхностного потока, усл. ед.; n – коэффициент Маннинга.

Значения характеристик слоя дождя и объема стока на территорию бассейна реки Сейм Губкинского района взяты из открытого источника на геопортале «Речные бассейны Европейской России» [Геопортал ..., 2025]. Значения почвенных показателей применены на основе параметров основных типов почв Белгородской области [Соловиченко, Тютюнов, 2013]. Принимая во внимание, что для почв с плотностью сложения 1,2 г/см³ можно не учитывать силы сцепления между почвенными агрегатами [Кузнецов, 1981], для критической скорости Ю.П. Сухановским предлагается использовать уравнение Ц.Е. Мирцхулавы [Мирцхулава, 1971]. В данной работе применено уравнение Ц.Е. Мирцхулавы в модификации М.С. Кузнецова.

Остальные параметры были вычислены расчетным путем с применением технологий пространственного анализа с использованием геоинформационных систем.

Результаты и их обсуждение

Сопоставление результатов оценки почвенных потерь от ливневой эрозии осуществлено в программном комплексе *ArcMap* (рис. 2), а также импортированы в *Excel* для осуществления расчетов процентного соотношения распределения пашни по эрозионным потерям.

В результате проведенной работы расчеты показали расхождения значений среднегодового модуля потерь почвы от ливневых дождей. Среднегодовые потенциальные почвенные потери с пашни составили по модели *USLE* – 7,0 т/га, по адаптированной для условий России эрозионной модели *USLE* [Ларионов, 1993] – 3,5 т/га, по модели, разработанной коллективом авторов ВНИИЗиЗПЭ [Герасименко, Кумани, 2000], – 5,4 т/га, по модели [Сухановский, Пискунов, 2007] – 6,0 т/га.

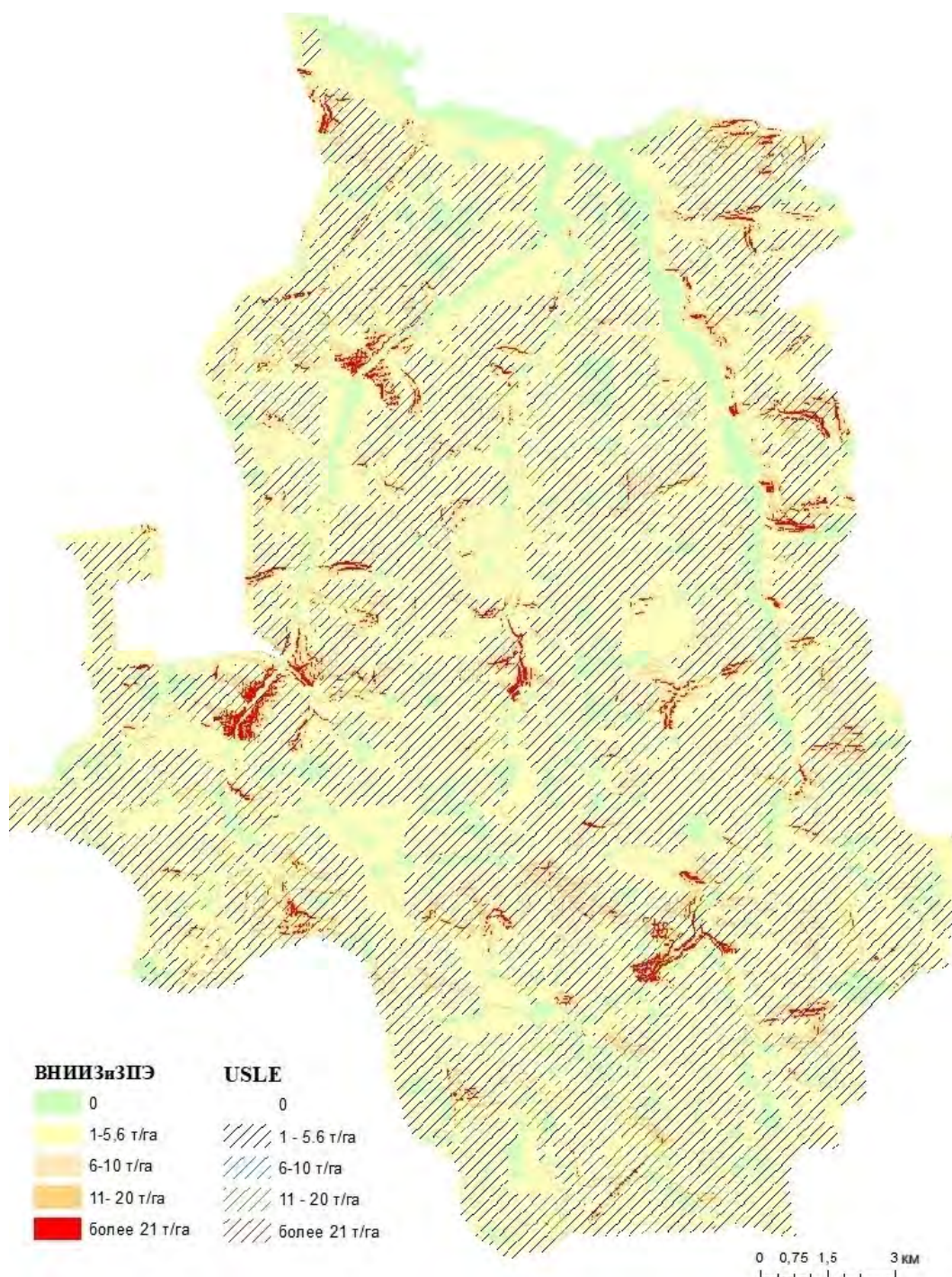


Рис. 2. Растр потенциальных эрозионных потерь почв от ливневой эрозии на пахотных землях бассейна реки Сейм Губкинского района
Fig. 2. Raster of potential soil erosion losses from storm erosion on arable lands in the Seym River basin of the Gubkinsky District

Для сравнения результатов работ в данном исследовании за предельную величину смыва почвы с пара принимали значения, исходя из допустимых норм эрозии. По обобщенным оценкам для сельскохозяйственных угодий Белгородской области допустимая норма эрозии составляет 4,5–5,6 т/га в год [Марциневская, 2011; Спесивый, Лисецкий, 2014].

Анализ значений, полученных в результате расчетов (таблица), а также картограммы, построенной по значениям смыва почв от составляющих факторов (рис. 3), показал, что на большей части бассейна (более 80 %) модуль смыва находится в диапазоне 0–5,6 т/га, при этом схожие расчетные результаты дают формулы Ларионова Г.А. и коллектива авторов ВНИИЗиЗПЭ – Герасименко В.П. и Кумани М.В., Сухановского Ю.П. и Пискунова А.Н. Закономерности, полученные по этим формулам, показывают, что часть земель подвергается слабым, умеренным и средним эрозионным процессам, а на склонах балок отмечается сильная эрозия более 20 т/га в год. При этом, проведенные по этим методикам расчеты, свидетельствуют, что доля смыва почв в объеме более 10 т/га отличается на 1,8 %. При сопоставлении растров потенциальных эрозионных потерь почв от ливневой эрозии, рассчитанных по формулам (1), (6), (7) и [Ларионов, 1993] (см. рис. 3) отмечено, что расхождение в итоговых значениях смыва почв зафиксированы на склоновых землях. Расхождение в объеме смыва почвы наблюдается на склонах разных экспозиций и углах наклона: 1–2° в объеме 1–2 т/га; на склонах 2–3° – 3–5,6 т/га, на склонах 3–5° – 5,2–10 т/га, на склонах > 5° – более 10 т/га. Данный факт необходимо учитывать при проектировании противоэрозионных мероприятий.

Объем среднегодовых почвенных потерь от ливневой эрозии
в бассейне реки Сейм Губкинского района Белгородской области
Average annual soil losses from storm erosion in the Seym River basin
of the Gubkinsky District of the Belgorod Region

Модели	Среднегодовой объем смыва почвы, т/га	Распределение пашни по эрозионным потерям (т/га в год), %				
		0–5,6	5,6–10	10–20	20–50	> 50
USLE, [Wischmeier, Smith, 1978]	7,0	82	8,7	6,4	2,4	0,5
Ларионов [1993]	3,5	86	8	6		
Герасименко, Кумани [2000]	5,4	85,5	10,3	3,5	0,65	0,05
Сухановский, Пискунов [2007]	6,0	85,1	9,8	3,8	1,1	0,2

Виду того, что расчет факторов, составляющих универсальное уравнение USLE, осуществляли по формуле, предложенной ее авторами, но не адаптированным для территории европейской части России, итоговые результаты размера почвенных потерь показали значительные расхождения с результатами, полученными при применении формул (6), (7) и [Ларионов, 1993].

Для всех рассмотренных формул расчета среднегодовых почвенных потерь от ливневой эрозии отмечена высокая доля зависимости от фактора агрофона. Поэтому при расчете по этим моделям смыва почв необходимо детальное рассмотрение растительного покрова, в том числе по культурам и фазам развития растений. Данный фактор учтен в формуле Сухановского Ю.П. и Пискунова А.Н., но лишь в ограниченном количестве коэффициентов, характерных для узкого типа агрофона.

Стохастическая модель дождевой эрозии почв, описанная в работе Сухановского Ю.П. и Пискунова А.Н. сложна в применении в региональном масштабе ввиду наличия факторов, требующих алгебраических вычислений, а также отсутствия точных значений входящих в модель параметров на всю территорию как бассейнов рек, так и муниципальных образований. Данная модель хорошо применима в границах участков сельскохозяйственных полей, что доказано в работе [Сухановский, Пискунов, 2007]. Модель USLE и

адаптированная для условий Европейской России модель [Ларионов, 1993] показали простоту применения в геоинформационной среде, но также требуют верификации входящих параметров. Характерные для склонов более 5° объемы смыва почв в пределах 11–13 т/га показали различные итоги при расчете используемых моделей. Так, в пределах бассейна доля пахотных земель, на которых наблюдается смыв пашни в объеме более 10 т/га, рассчитанная по формуле *USLE*, отличается от значений, рассчитанных по другим приведенным выше формулам почти в 2 раза. Это свидетельствует о необходимости применения в конкретных условиях моделей, располагающих входными параметрами, соответствующими условиям исследуемой территории.

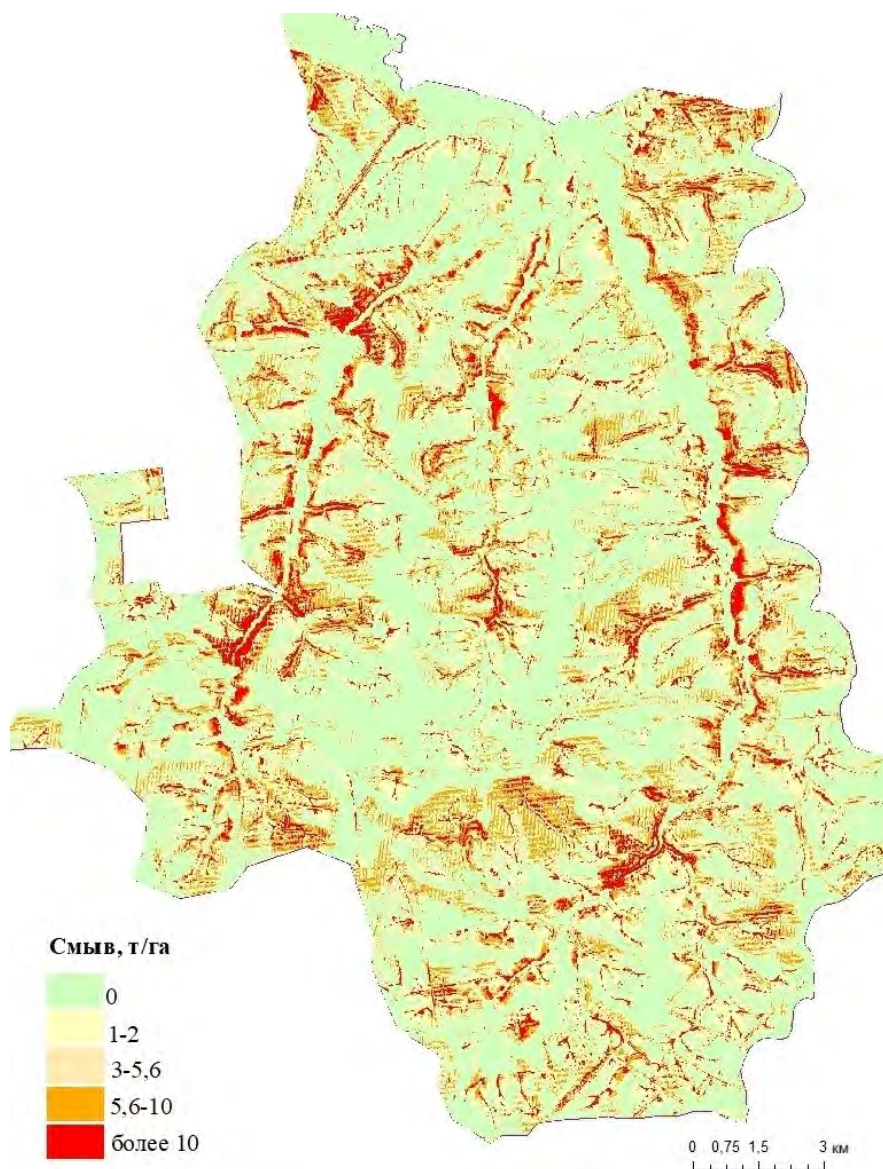


Рис. 3. Растр расхождения в результатах расчета потенциальных эрозионных потерь почв
Fig. 3. Raster of discrepancies in the calculation of potential soil erosion losses

Заключение

Результаты расчетов среднегодовых потенциальных почвенных потерь с пашни, выполненные на исследуемой территории водосборного бассейна, изменяются от 3,5 т/га до 7,0 т/га, что объясняется различными входными параметрами для формул расчета и введением дополнительных критериев оценки.

Эрозионная модель USLE в редакции Г.А. Ларионова адаптирована для условий европейской части России. Применение в этой модели дополнительных совокупных морфометрических данных рельефа, поправок на эродируемость почв, показало в результате значение среднегодового смыва почв в 2 раза меньше, чем при применении модели USLE в ее первоначальном выражении. Сложность формулы состоит в большом количестве входных показателей при расчете факторов эродируемости почв и фактора рельефа, что может осложнить решение данного вопроса при отсутствии того или иного входящего параметра у исследователя. В более простом выражении представлена модель, разработанная коллективом авторов лаборатории моделирования эрозионных процессов ВНИИЗиЗПЭ Герасименко В.П. и Кумани М.В, она проста в применении и имеет численные коэффициенты, отражающие влияние на эрозионные процессы степени эродированности пашни, зависимости от вида агрофона в вегетационный период, а также зависимость от применяемых почвозащитных агротехнических или гидромелиоративных приемов на пашне, не требующие сложной геопространственной обработки. Но выполненные по данной методике расчеты показали значение среднегодовых потенциальных потерь почвы в 1,5 раза выше, чем рассчитанные по модели USLE, адаптированной Ларионовым Г.А., поэтому требуется дополнительное изучение степени влияния составляющих факторов в этих моделях на итоговые значения смыва почв.

Расчет по модели, разработанной коллективом авторов лаборатории моделирования эрозионных процессов ВНИИЗиЗПЭ Сухановским Ю.П. и Пискуновым А.Н., показал значения среднегодовых потенциальных потерь в объеме 6,0 т/га. Модель также удобна в применении, так как в отличие от предыдущих формул, где за эрозионный фактор дождя принимается потенциал ливневых осадков максимальной 30-минутной интенсивности, выраженный в условных единицах, здесь учитывается расширенный ряд гидрофизических параметров, от которых зависит объем почвенных потерь. Учитывая, что значения среднегодовых потерь почвы, рассчитанные по модели (7), и модели Ларионова Г.А. близки, также требуется дополнительное изучение степени влияния составляющих факторов на итоговый результат модели.

Рассмотренные в исследовании модели показали, что объем среднегодовых почвенных потерь от ливневой эрозии существенно зависит от набора различных входящих параметров. Поэтому применение в агроландшафтах бассейнов рек противоэрозионных мероприятий только на основе ограниченного выбора морфометрических характеристик рельефа может привести к некорректным управленческим решениям, что повлечет к негативным экономическим и экологическим последствиям.

Также, учитывая, что в рассмотренных моделях фактор агрофона представлен единым коэффициентом на всю исследуемую территорию, то в перспективе необходимо дополнительное изучение степени его влияния и введение в модель фактора, полученного на основе индексов землепользования, рассчитанных для пахотных земель по методике типизации земельного покрова.

Список литературы

- Геопортал «Речные бассейны Европейской России». Электронный ресурс. URL: <https://bassepr.kpfu.ru/> (дата обращения: 02 июля 2025).
- Инструкция по определению расчетных гидрологических характеристик при проектировании противоэрозионных мероприятий на Европейской территории СССР. 1979. Л., Гидрометеиздат, 62 с.
- Методические указания по проектированию противоэрозионной организации территории при внутрихозяйственном землеустройстве в зонах проявления водной эрозии. 1989. Под ред. Карцева Г.А., Луки А.Н., Носова С.И. и др. М., 79 с.
- Сухановский Ю.П., Пискунов А.Н. 2007. Модель с программным обеспечением для прогнозирования дождевой эрозии для пахотных земель. Курск, ВНИИЗиЗПЭ РАСХН, 20 с.



Список литературы

- Буряк Ж.А., Нарожняя А.Г., Маринина О.А. 2023. Эрозионная опасность пахотных земель Белгородской области. Региональные геосистемы, 47(1): 101–115. <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2023-47-1-101-115>
- Герасименко В.П., Кумани М.В. 2000. Рекомендации по регулированию почвенно-гидрологических процессов на пахотных землях. Курск, ВНИИЗиЗПЭ, 108 с.
- Голосов В.Н. 2006. Эрозионно-аккумулятивные процессы в речных бассейнах освоенных равнин. М., ГЕОС, 296 с.
- Голосов В.Н., Жидкин А.П., Петелько А.И., Осипова М.С., Иванова Н.Н., Иванов М.М. 2022. Полевая верификация эрозионных моделей на основе исследований малого водосбора в бассейне р. Воробжи (Курская область). Почвоведение, 10: 1321–1338. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22100045>.
- Ермолаев О.П. 1992. Пояса эрозии в природно-антропогенных речных ландшафтах речных бассейнов. Казань, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 148 с.
- Иванов А.Л., Савин И.Ю., Столбовой В.С., Аветян С.А., Шишконокова Е.А., Каштанов А.Н. 2020. Карта агрогенной эродированности почв России. Доклады Российской академии наук. Науки о земле, 493(2): 99–102. <https://doi.org/10.31857/S2686739720080095>
- Иванов В.Д. 1975. Оценка влияния экспозиции склона на сток талых вод и смыв почвы. Почвоведение, 10: 78–82.
- Кузнецов М.С. 1981. Противозерозионная стойкость почв. М., Изд-во МГУ, 135 с.
- Ларионов Г.А. 1993. Эрозия почв и дефляция: основные закономерности и количественные оценки. М., Изд-во МГУ, 200 с.
- Ларионов Г.А., Добровольская Н.Г., Краснов С.Ф., Лю Б.Ю., Неринг М.А. 1998. Теоретико-эмпирическое уравнение фактора рельефа для статистических моделей водной (дождевой) эрозии. В кн.: Эрозия почв и русловые процессы. М., Макс-Пресс Москва: 25–44.
- Лисецкий Ф.Н., Половинко В.В. 2012. Эрозионные катены на земляных фортификационных сооружениях. Геоморфология, 2: 65–78.
- Лисецкий Ф.Н., Светличный А.А., Черный С.Г. 2012. Современные проблемы эрозиоведения. Белгород, Константа, 456 с. <https://doi.org/10.13140/2.1.1029.9682>
- Марциневская Л.В. 2011. Определение допустимых эрозионных потерь почвы для уровня административных районов. Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований, 10–1: 10–13.
- Мирихулава Ц.Е. 1971. Инженерные методы расчета и прогноза водной эрозии. М., Колос, 239 с.
- Смирнова Л.Г., Нарожняя А.Г., Шамарданова Е.Ю. 2012. Сравнение двух методов расчета смыва почвы на водосборах с применением ГИС-технологий. Достижения науки и техники АПК, 9: 10–12.
- Соловиченко В.Д., Тютюнов С.И. 2013. Почвенный покров Белгородской области и его рациональное использование. Белгород, Отчий край, 371 с.
- Спесивый О.В., Лисецкий Ф.Н. 2014. Оценка интенсивности и нормирование эрозионных потерь почвы в Центрально-Черноземном районе на основе бассейнового подхода и современных геоинформационных технологий. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия Естественные науки, 10(181): 125–132.
- Сурмач Г.П. 1992. Рельефообразование, формирование лесостепи, современная эрозия и противозерозионные мероприятия. Волгоград, Б. и., 175 с.
- Сурмач Г.П. 1985. О допустимых нормах эрозии и классификации почв по смывистости. Почвоведение, 7: 103–111.
- Bagherzadeh A. 2014. Estimation of Soil Losses by USLE Model Using GIS at Mashhad Plain, Northeast of Iran. Arabian Journal of Geosciences, 7: 211–220. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0730-3>, 2014
- David W.P. 1988. Soil and Water Conservation Planning: Policy Issues and Recommendations. Journal of Philippine Development, 15: 47–84.
- Desmet P.J.J., Govers G. 1996. A GIS Procedure for Automatically Calculating the USLE LS Factor on Topographically Complex Landscape Units. Journal of soil and water conservation, 51(5): 427–433. <https://doi.org/10.1080/00224561.1996.12457102>
- McCool D.K., Renard K.G., Foster G.R. 1994. The Revised Universal Soil Loss Equation. Proceedings of an International Workshop on Soil Erosion. In: The Center for Technology Transfer and Pollution Prevention, Purdue University. USA, West Lafayette: 45–59.

- Morgan R.P.C. 1979. Soil Erosion. London, New York, Longman, 113 p.
- Panagos P., Borrelli P., Meusburger K. 2015. A New European Slope Length and Steepness Factor (LS-Factor) for Modeling Soil Erosion by Water. *Geosciences*, 5(2): 117–126. <https://doi.org/10.3390/geosciences5020117>.
- Renard K., Foster G., Weesies G., McCool D., Yoder D. 1997. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), *Agricultural Handbook*, 703: 65–100. <https://doi.org/10.1201/9780203739358-5>.
- Wischmeier W.H., Smith D.D. 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning. United States, Department of Agriculture, *Agriculture handbook*, 58 p.
- Zhidkin A., Fomicheva D., Ivanova N., Dostál T., Yurova A., Komissarov M., Krása J. 2022. A Detailed Reconstruction of Changes in the Factors and Parameters of Soil Erosion Over the Past 250 Years in the Forest Zone of European Russia (Moscow Region). *International Soil and Water Conservation Research*, 10: 149–160. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.06.003>

References

- Buryak Zh.A., Narozhnyaya A.G., Marinina O.A. 2023. Erosion Risk of Arable Land in the Belgorod Oblast. *Regional Geosystems*, 47(1): 101–115 (in Russian) <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2023-47-1-101-115>.
- Gerasimenko V.P., Kumani M.V. 2000. Rekomendatsii po regulirovaniyu pochvenno-gidrologicheskikh protsessov na pakhotnykh zemlyakh [Recommendations for Regulating Soil and Hydrological Processes on Arable Lands]. Kursk, Publ. VNIIZiZPE, 108 p.
- Golosov V.N. 2006. Erosionno-akkumulyativno protsessy v rechnykh basseynakh osvoennykh ravnin [Erosion and Accumulation Processes in the River Basins of Developed Plains]. Moscow, Publ. GEOS, 296 p.
- Golosov V.N., Zhidkin A.P., Petel'ko A.I., Osipova M.S., Ivanova N.N., Ivanov M.M. 2022. Field Verification of Erosion Models Based on the Studies of a Small Catchment in the Vorobzha River Basin (Kursk Oblast, Russia). *Eurasian Soil Science*, 55(10): 1508–1523 (in Russian).
- Ermolaev O.P. 1992. Poyasa erosii v prirodno-antropogennykh rechnykh landshaftakh rechnykh basseinov [Erosion Belts in Natural and Anthropogenic River Landscapes of River Basins]. Kazan, Publ. Kazanskiy (Privolzhskiy) federalnyy universitet, 148 p.
- Ivanov A.L., Savin I.Yu., Stolbovoy V.S., Avetyan S.A., Shishkonakova E.A., Kashtanov A.N. 2020. Map of Anthropogenic Soil Erosion of Russia. *Doklady Earth Sciences*, 493(2): 654–657 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S1028334X20080097>
- Ivanov V.D. 1975. Otsenka vliyaniya ekspozitsii sklona na stok talykh vod i smyv pochvy [Estimation of the Influence of Slope Exposure on Runoff of Meltwater and Soil Erosion]. *Pochvovedeniye*, 10: 78–82.
- Kuznetsov M.S. 1981. Protivoerosionnaya stoikost pochv [Anti-Erosion Resistance of Soils]. Moscow, Publ. MSU, 135 p.
- Larionov G.A. 1993. Erosia i deflyatsiya pochv osnovnyye zakonomernosti i kolichestvennyye otsenki erosionnogo potentsiala dozhdevykh osadkov [Water and Wind Erosion: Main Features and Quantitative Assessment]. Moscow, Publ. MSU, 200 p.
- Larionov G.A., Dobrovolskaya N.G., Krasnov S.F., Liu B.Yu., Nering M.A. 1998. Teoretico-empiricheskoye uravneniye faktora relyefa dlya statisticheskikh madeley vadoy (dozhdevoy) erozii [Theoretical and Empirical Equation of the Relief Factor for Statistical Models of Water (Rainfall) Erosion]. In: *Erosia pochv i ruslovye protsessy* [Soil Erosion and Channel Processes]. Moscow, Publ. Max-Press Moscow: 25–44.
- Lisetsky F.N., Polovinko V.V. 2012. Erosion Catenas on Earthen Fortifications. *Geomorfologiya*, 2: 65–78 (in Russian).
- Lisetsky F.N., Svetlichnyi A.A., Chernyi S.G. 2012. Recent Developments in Erosion Science. Belgorod, Publ. Konstanta, 456 p. (in Russian). <https://doi.org/10.13140/2.1.1029.9682>.
- Marcinevskaya L.V. 2011. Determination of Soil Loss Tolerance for the Level of Administrative Districts. *International journal of applied and fundamental research*, 10(1): 10–13 (in Russian).
- Mirtskhulava Ts.E. 1971. Inzhenernye metody rascheta i prognoza vodnoi erosii [Engineering Methods of Calculation and Prediction of Water Erosion]. Moscow, Publ. Kolos, 239 p.



- Smirnova L.G., Narozhnyaya A.G., Shamardanova E.Yu. 2012. Comparison of Two Methods of Soil Ablation Calculation in Catchments with GIS Technology. *Achievements of Science and Technology of AIC*, 9: 10–12 (in Russian).
- Solovichenko V.D., Tyutyunov S.I. 2013. *Pochvennyy pocrov Belgorodskoy oblasti i ego ratsionalnoye ispolzovaniye* [Soil Cover of the Belgorod Region and Its Rational Use]. Belgorod, Publ. Otchiy Krai, 371 p.
- Spesivy O.V., Lisetskii F.N. 2014. Estimate of the Intensity and Regulation of Erosion Soil Losses in Central Chernizem Region Based on the Basin Approach. *Belgorod State University Scientific Bulletin. Natural Sciences Series*, 10(181): 125–132 (in Russian).
- Surmach G.P. 1992. *Reliefobrasovanie, formirovanie lesostepi, sovremennaya erosiya i protivooerosionnye meropriyatiya* [Relief Formation, Forest-steppe Formation, Modern Erosion, and Anti-erosion Measures]. Volgograd, Publ. B. i., 175 p.
- Surmach G.P. 1985. O dopustimyykh normakh erozii i klassifikatsii pochv po smytosti [On the Permissible Rates of Erosion and Soil Classification by Erodibility]. *Pochvovedeniye*, 7: 103–111.
- Bagherzadeh A. 2014. Estimation of Soil Losses by USLE Model Using GIS at Mashhad Plain, Northeast of Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 7: 211–220. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0730-3>, 2014
- David W.P. 1988. Soil and Water Conservation Planning: Policy Issues and Recommendations. *Journal of Philippine Development*, 15: 47–84.
- Desmet P.J.J., Govers G. 1996. A GIS Procedure for Automatically Calculating the USLE LS Factor on Topographically Complex Landscape Units. *Journal of soil and water conservation*, 51(5): 427–433. <https://doi.org/10.1080/00224561.1996.12457102>
- McCool D.K., Renard K.G., Foster G.R. 1994. The Revised Universal Soil Loss Equation. *Proceedings of an International Workshop on Soil Erosion*. In: *The Center for Technology Transfer and Pollution Prevention*, Purdue University. USA, West Lafayette: 45–59.
- Morgan R.P.C. 1979. *Soil Erosion*. London, New York, Longman, 113 p.
- Panagos P., Borrelli P., Meusburger K. 2015. A New European Slope Length and Steepness Factor (LS-Factor) for Modeling Soil Erosion by Water. *Geosciences*, 5(2): 117–126. <https://doi.org/10.3390/geosciences5020117>.
- Renard K., Foster G., Weesies G., McCool D., Yoder D. 1997. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), *Agricultural Handbook*, 703: 65–100. <https://doi.org/10.1201/9780203739358-5>.
- Wischmeier W.H., Smith D.D. 1978. *Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning*. United States, Department of Agriculture, *Agriculture handbook*, 58 p.
- Zhidkin A., Fomicheva D., Ivanova N., Dostál T., Yurova A., Komissarov M., Krása J. 2022. A Detailed Reconstruction of Changes in the Factors and Parameters of Soil Erosion Over the Past 250 Years in the Forest Zone of European Russia (Moscow Region). *International Soil and Water Conservation Research*, 10: 149–160. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.06.003>

*Поступила в редакцию 19.07.2025;
поступила после рецензирования 29.08.2025;
принята к публикации 09.09.2025*

*Received July 19, 2025;
Revised August 29, 2025;
Accepted September 09, 2025*

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.
Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Григорьева Олеся Ивановна, старший преподаватель кафедры природопользования и земельного кадастра, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Olesya I. Grigoreva, Senior lecturer of the Department of Environmental Management and Land Cadastre, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia