

ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ ОЦЕНКА ФАКТОРОВ ЭРОЗИИ ПОЧВ (R, K, LS, C, P) БАСЕЙНА САНГЗАРСАЙ НА ОСНОВЕ ЛОКАЛИЗОВАННОЙ МОДЕЛИ RUSLE

Кодирова Дилрабо Абдукаримовна¹

¹Ташкентский государственный аграрный университет,
Ташкент, Узбекистан

профессор кафедры агрохимии и почвоведения

<https://orcid.org/0000-0002-6644-4945>

Шерманов Бекназар Ортикович²

²Alfraganus University, Ташкент, Узбекистан

ассистент кафедры биологии

<https://orcid.org/0009-0004-2230-5515>

АННОТАЦИЯ

Введение. Эрозия почв — один из ведущих факторов деградации сельскохозяйственных земель, однако факторы модели RUSLE (R, K, LS, C, P) ранее не были локализованы на основе местных данных для бассейна реки Сангзарсай (259 719,3 га, Джизакская область, Узбекистан), объединяющего горные, предгорные, адырные и равнинные ландшафты.

Материалы и методы. Использованы многолетний (2000–2024 гг.) ряд осадков метеостанции Бахмал, данные 28 почвенных контуров (SoilCode), 80 образцов механического анализа, цифровая модель рельефа (30×30 м) и снимки Sentinel-2. Факторы R, K, LS, C и P рассчитаны по стандартным зависимостям RUSLE/EPIC-SWAT и приведены к единой растровой модели в среде ArcGIS 10.8.1 и QGIS.

Результаты. Среднегодовая сумма осадков составила 444,4 мм (211,3–626,7 мм), 42,3% которых приходится на весенний период; пространственный диапазон R-фактора — 561,4–951,7. Значения K-фактора варьировали в узком диапазоне 0,02193–0,02351 (среднее 0,022499) при статистически значимых корреляциях с гранулометрическим составом ($r(K, SIL)=+0,791$; $r(K, CLA)=-0,800$). Наибольшие значения LS-фактора сосредоточены на крутых предгорных склонах.

Обсуждение/Выводы. Узкий диапазон *K*-фактора указывает на определяющую роль рельефа и растительного покрова в формировании эрозионного риска. Разработанный интегральный геоинформационный алгоритм обеспечивает воспроизводимость расчётов и служит основой приоритизации почвозащитных мероприятий на пастбищных (47,44%) и богарных (34,96%) землях бассейна.

Ключевые слова: *RUSLE*, эрозия почв, ГИС, *K*-фактор, *R*-фактор, *LS*-фактор, бассейн Сангзарсай, Узбекистан, цифровая модель рельефа.

ABSTRACT

Introduction. Soil erosion is a leading driver of agricultural land degradation, yet the *RUSLE* model factors (*R*, *K*, *LS*, *C*, *P*) had not previously been localized using site-specific data for the Sangzarsoy River basin (259,719.3 ha, Jizzakh region, Uzbekistan), which spans mountain, foothill, adyr and plain landscapes.

Methods. A 2000–2024 rainfall record from the Bakhmal weather station, data from 28 soil-contour (*SoilCode*) units, 80 mechanical-analysis samples, a 30×30 m digital elevation model and Sentinel-2 imagery were used. The *R*, *K*, *LS*, *C* and *P* factors were computed using standard *RUSLE/EPIC-SWAT* relationships and standardized into a single raster model in ArcGIS 10.8.1 and QGIS.

Results. Mean annual precipitation was 444.4 mm (range 211.3–626.7 mm), with 42.3% falling in spring; the spatial *R*-factor ranged from 561.4 to 951.7. *K*-factor values varied within a narrow range of 0.02193–0.02351 (mean 0.022499), with statistically significant correlations to particle-size composition ($r(K, SIL) = +0.791$; $r(K, CLA) = -0.800$). The highest *LS*-factor values were concentrated on steep foothill slopes.

Discussion/Conclusions. The narrow *K*-factor range indicates that relief and cover conditions are the dominant drivers of erosion risk. The developed integral GIS algorithm ensures reproducibility and provides a basis for prioritizing soil-

conservation measures on pasture (47.44%) and rainfed cropland (34.96%), which together occupy 82.40% of the basin.

Keywords: *RUSLE, soil erosion, GIS, K-factor, R-factor, LS-factor, Sangzarsoy basin, Uzbekistan, digital elevation model.*

АННОТАЦИЯ

Киритиш. *Тупроқ эрозияси қишлоқ хўжалиги ерлари деградациясининг етакчи омилларидан бири ҳисобланади, бироқ **RUSLE** модели омиллари (R , K , LS , C , P) илгари Санғзарсой ҳавзаси (259 719,3 га, Жиззах вилояти, Ўзбекистон) учун маҳаллий маълумотлар асосида баҳоланмаган эди.*

Материаллар ва усуллар. *Бахмал метеостанциясининг 2000–2024 йиллардаги ёгин қатори, 28 та тупроқ контури (**SoilCode**) маълумотлари, 80 та механик таҳлил намунаси, 30×30 м ўлчамли рақамли рельеф модели ва **Sentinel-2** тасвирларидан фойдаланилди. R , K , LS , C ва P омиллари стандарт **RUSLE/EPIC-SWAT** боғланишлари асосида ҳисобланиб, **ArcGIS 10.8.1** ва **QGIS** муҳитида ягона растр моделга келтирилди.*

Натижалар. *Ўртача йиллик ёгин миқдори 444,4 мм (211,3–626,7 мм) бўлиб, унинг 42,3 фоизи баҳор мавсумига тўғри келди; R -омилнинг фазовий диапазони 561,4–951,7 ни ташкил этди. K -омил қийматлари 0,02193–0,02351 (ўртача 0,022499) тор оралигида бўлиб, гранулометрик таркиб билан статистик аҳамиятли боғлиқлик кузатилди ($r(K, SIL) = +0,791$; $r(K, CLA) = -0,800$). LS -омилнинг энг юқори қийматлари тик тоғолди қияликларида тўпланди.*

Муҳокама/Хулоса. *K -омилнинг тор диапазони эрозия хавфини шакллантиришда рельеф ва ўсимлик қоплами омилларининг устувор эканини кўрсатади. Ишлаб чиқилган интеграл геоахборот алгоритми ҳисоблар қайта тикланувчанлигини таъминлайди ва ҳавзанинг 82,40 фоизини ташкил этувчи яйлов (47,44%) ва лалми (34,96%) ерларида тупроқ муҳофазаси тадбирларини устуворлаштириши учун асос бўлади.*

Калим сўзлар: RUSLE, тупроқ эрозияси, ГАТ, К-омил, R-омил, LS-омил, Сангзарсой ҳавзаси, Ўзбекистон, рақамли рельеф модели.

ВВЕДЕНИЕ

Эрозия почв остаётся одним из главных процессов деградации сельскохозяйственных земель, снижения плодородия и устойчивости ландшафтов во всём мире. Модель USLE и её пересмотренная версия RUSLE с факторной структурой $A = R \times K \times LS \times C \times P$ широко признаны основным инструментом количественной и пространственной оценки потенциального смыва почвы [18, 19].

Развитие геоинформационных технологий и цифровых моделей рельефа существенно расширило возможности применения RUSLE в различных физико-географических условиях. Применение лазерного сканирования и дистанционного зондирования для оценки интенсивности и динамики почвенной эрозии рассмотрено в работе [4], а вопросы применимости цифровых моделей рельефа для расчётов эрозии на малых водосборах — в исследовании [7]. Использование цифровых моделей рельефа в расчётах темпов смыва почв на пахотных землях подробно освещено в [13], а картографирование эрозионных структур почвенного покрова на основе имитационных моделей смыва — в работе [10].

Комплексный геоинформационный подход к ландшафтным исследованиям обоснован в [11], а картографирование и моделирование агроландшафтов средствами ГИС — в [17]. Методика оценки эрозионной опасности почв с применением ГИС-технологий представлена в [12], возможности выявления потенциальных участков развития водной эрозии в производственно-хозяйственных системах — в [15]. Роль катастрофических эрозионных событий в среднемноголетних темпах эрозии и аккумуляции в антропогенно-преобразованных ландшафтах оценена в [8], а изменение структуры овражной эрозии на европейской территории России — в [9].

Факторы возникновения и развития эрозионных процессов на склоновых землях, а также причины и последствия водной эрозии в условиях склоновых агроландшафтов рассмотрены в работах [1, 2]. Фактические и допустимые показатели эрозионно-гидрологических процессов на вероятностной основе изучены в [3]. Применение цифровых технологий при изучении водной эрозии почв Западной Сибири обосновано в [14], а эколого-хозяйственная оценка бассейна Сырдарьи с применением геоинформационных технологий выполнена в [16].

Применительно к условиям Узбекистана отдельные аспекты водной эрозии в горных районах рассмотрены в [6], а опыт создания противоэрозионных древесных насаждений в условиях Ташкентской области обобщён в [5]. Вместе с тем в этих исследованиях бассейн реки Сангзарсай, расположенный в зоне сопряжения Туркестанского и Нуратинского хребтов, не рассматривался как единый объект локализации факторов R, K, LS, C и P на основе местных почвенных, метеорологических и рельефных данных.

Целью настоящей работы является количественная и пространственная оценка факторов модели RUSLE (R, K, LS, C, P) для бассейна Сангзарсай на основе локализованных полевых, лабораторных, картографических и дистанционно-зондировочных данных, а также разработка воспроизводимого интегрального геоинформационного алгоритма их совмещения.

Расчётные формулы факторов RUSLE

Фактор эрозивности осадков (R) рассчитывали по региональной зависимости:

$$R = 1,03 \times P$$

где P — среднегодовая сумма атмосферных осадков, мм.

Фактор эродированности почвы (K) определяли с учётом гранулометрического состава и содержания органического углерода:

$$K = F_{\text{песок}} \times F_{\text{пыль-глина}} \times F_{\text{орг}} \times F_{\text{выс.песок}} \times 0,1317$$

где $F_{\text{песок}}$, $F_{\text{пыль-глина}}$, $F_{\text{орг}}$ и $F_{\text{выс.песок}}$ — коэффициенты, рассчитанные по зависимостям EPIC/SWAT с учётом содержания песка (SAN), пылевой фракции (SIL), глины (CLA) и органического углерода (OC).

Содержание органического углерода рассчитывали из содержания гумуса:

$$OC(\%) = \frac{\text{Гумус}(\%)}{1,724}$$

Фактор длины и крутизны склона (LS) рассчитывали по выражению:

$$LS = \left(\frac{FA \times \text{Cellsize}}{22,13} \right)^{0,4} \times \left[\frac{\sin \left(\text{Slope} \times \frac{\pi}{180} \right)}{0,0896} \right]^{1,3}$$

где FA — величина накопления стока (Flow Accumulation); Cellsize — размер ячейки растра, м; Slope — угол наклона склона, градусы.

Фактор растительного покрова (C) задавали дифференцированно по классам землепользования и состоянию растительного покрова:

$$C = C_i, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

где C_i — значение фактора для соответствующего класса землепользования или растительного покрова.

Фактор противоэрозионных мероприятий (P) определяли по классам уклона и применяемым почвозащитным мероприятиям:

$$P = P_j, \quad j = 1, 2, \dots, m$$

где P_j — значение фактора для соответствующего класса уклона и вида противоэрозионных мероприятий.

Итоговое уравнение RUSLE:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P$$

где A — расчётные среднегодовые потери почвы, т/га/год; R — фактор эрозивности осадков; K — фактор эродированности почвы; LS — фактор длины и крутизны склона; C — фактор растительного покрова; P — фактор противоэрозионных мероприятий.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

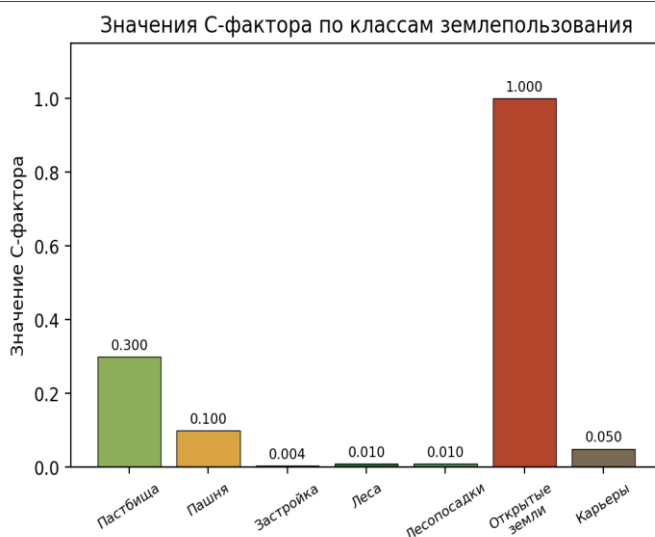
3.1. Осадки и фактор эрозивности R

За период 2000–2024 гг. среднегодовая сумма осадков на метеостанции Бахмал составила 444,4 мм при минимуме 211,3 мм (2021 г.) и максимуме 626,7 мм (2002 г.). Контрольный расчёт по формуле $R = 1,03 \times 444,4$ дал значение 457,7; после пространственной интерполяции значения R -фактора в пределах бассейна варьировали в диапазоне 561,4–951,7.

Таблица 1

Показатели осадков, обосновывающие R -фактор (2000–2024 гг.)

Показатель	Значение
Период наблюдений	2000–2024
Среднегодовые осадки, мм	444,4
Минимум осадков, мм (год)	211,3 (2021)
Максимум осадков, мм (год)	626,7 (2002)
Доля весенних осадков, %	42,3
Расчётное $R = 1,03 \times P$	457,7
Диапазон R -фактора (растр)	561,4–951,7



Сезонное распределение осадков (2000–2024 гг.)

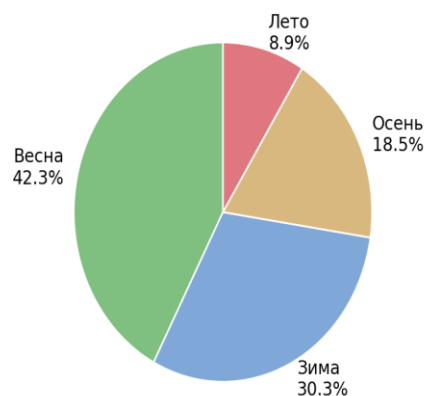


Рисунок 1 — а) значения C -фактора по классам землепользования; б) сезонное распределение осадков в бассейне Сангзарсай, 2000–2024 гг.

Доля весенних осадков (42,3%) совпадает по времени с периодом неполного развития растительного покрова на богарных и пастбищных

угодьях, что обуславливает повышенный риск формирования поверхностного стока именно в этот сезон. Это подтверждает необходимость сопряжённой (а не изолированной) интерпретации R-фактора совместно с сезонной динамикой C-фактора.

3.2. Эродлируемость почв — К-фактор

Расчёт К-фактора выполнен для 28 почвенных контуров (SoilCode) на основе 80 образцов механического анализа. Значения К варьировали в диапазоне 0,02193–0,02351 при среднем значении 0,022499.

Таблица 2

Обобщённые показатели для расчёта К-фактора

Показатель	Значение
Число SoilCode	28
Диапазон песка, %	30–42
Диапазон пыли, %	33–45
Диапазон глины, %	20–30
Органический углерод, %	0,80–1,25
Диапазон К-фактора	0,0219–0,0235
Среднее значение К-фактора	0,0225

Корреляционный анализ по 28 контурам показал статистически значимую положительную связь К-фактора с долей пылеватой фракции ($r = +0,791$) и отрицательную связь с долей глинистой фракции ($r = -0,800$); связь с содержанием песка ($r = +0,082$) и органического углерода ($r = -0,017$) оказалась слабой. Эти коэффициенты отражают внутреннюю согласованность расчётной модели К и служат контролем корректности расчётной базы, а не самостоятельным доказательством полевой причинности.

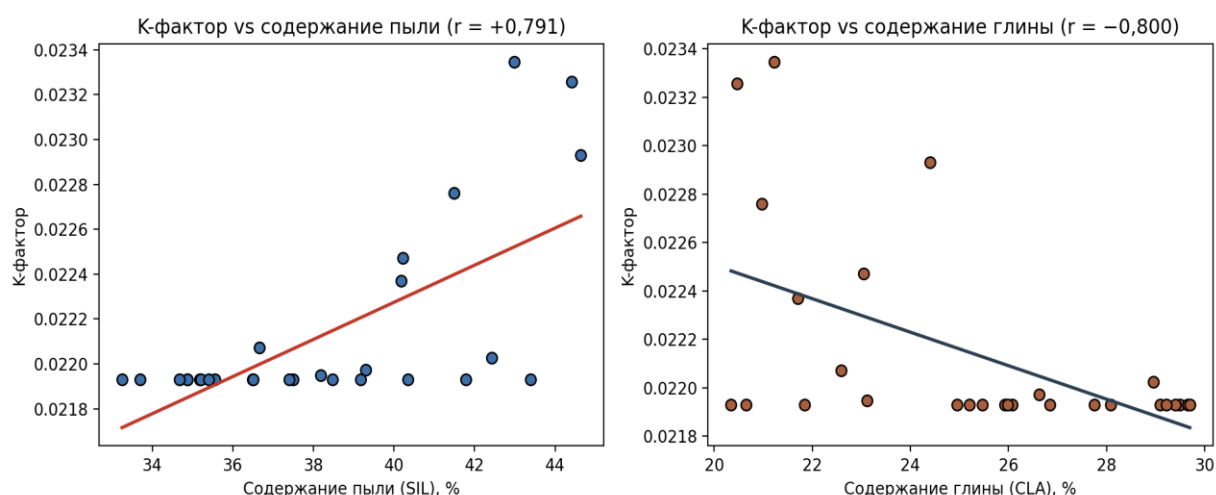


Рисунок 2 — Схематическая иллюстрация направления связи К-фактора с содержанием пыли и глины (по расчётным данным диссертации, $n = 28 \text{ SoilCode}$).

Несмотря на относительно узкий диапазон варьирования, К-фактор в сочетании с высокими значениями LS и R способен существенно влиять на итоговое значение A , поскольку выступает мультипликативным членом уравнения RUSLE. Узкий диапазон К указывает, что в формировании зон очень высокого эрозионного риска в бассейне Сангзарсай определяющую роль играют не столько почвенные, сколько рельефные и покровные факторы.

3.3. Длина и крутизна склона — LS-фактор

LS-фактор рассчитан на основе цифровой модели рельефа с разрешением 30×30 м с использованием слоёв направления и накопления стока. Наибольшие значения LS сосредоточены в предгорной зоне и на крутых склонах, где скорость поверхностного стока и риск образования эрозионных промоин максимальны.

Таблица 3

Интерпретация значений LS-фактора по классам рельефа

Значение LS-фактора	Рельефные условия	Эрозионная интерпретация
0 (техн. ноль)	плоские участки	влияние рельефа минимально

Значение LS-фактора	Рельефные условия	Эрозионная интерпретация
0,0000–0,2808	пологие склоны	низкое влияние поверхностного стока
0,2808–2,8562	склоны средней крутизны	риск эрозии нарастает с рельефом
2,8562–11,9896	крутые склоны	высокий риск смыва почвы
>11,9896	крутые склоны с концентрацией стока	очень высокий рельефно-эрозионный риск

Дополнительный анализ экспозиции склонов показал, что на южных экспозициях (28,7% площади бассейна) средний класс эрозии составил 2,69, тогда как на северных (41,1%) — 2,55; данное различие объясняется большей инсоляцией южных склонов и, соответственно, меньшей влажностью почвы и разреженностью растительного покрова. Между топографическим индексом влажности (TWI) и классом эрозии установлена связь $r = 0,513$ ($p < 0,001$), а анализ кривизны профиля показал, что вогнутые поверхности (28,4% площади) характеризуются наибольшим средним классом эрозии (3,64) по сравнению с выпуклыми (27,9%; 2,43 балла).

3.4. Растительный покров и противоэрозионные мероприятия — C и P факторы

Значения C-фактора дифференцированы по классам землепользования (таблица 4). Пастбища (47,44% площади) и богарные земли (34,96%) в совокупности занимают 82,40% бассейна и определяют основной антропогенно-регулируемый компонент эрозионного риска.

Таблица 4

Классы землепользования и значения C-фактора

Землепользование	Площадь, га	Доля, %	Значение C
Пастбища	123 222,5	47,44	0,300
Богарная пашня	90 798,5	34,96	0,100
Застроенные земли	19 807,7	7,63	0,004
Леса	16 037,4	6,17	0,010

Землепользование	Площадь, га	Доля, %	Значение С
Лесопосадки	4 585,2	1,77	0,010
Открытые (оголённые) земли	4 575,5	1,76	1,000
Карьеры	606,0	0,23	0,050

Таблица 5

Значения Р-фактора по классам уклона и виду мероприятий

Уклон, %	Контурная обработка	Полосной посев	Террасирование	Принятое Р
0–7,0	0,55	0,27	0,10	0,55
7,0–11,3	0,60	0,30	0,12	0,60
11,3–17,6	0,80	0,40	0,16	0,80
17,6–26,8	0,90	0,45	0,18	0,90
>26,8	0,90	0,50	0,20	1,00

Расчёты показали, что тип землепользования сам по себе не является автоматическим индикатором высокого риска: на пастбищах с плотным покровом и малым уклоном значение А может быть невысоким, тогда как сочетание разреженного покрова, крутого склона и концентрации стока резко увеличивает результат за счёт совместного действия С и LS. Это подтверждает необходимость факторного, а не только категориального подхода к интерпретации карты эрозионного риска.

3.5. Интегральный геоинформационный алгоритм

Разработанный алгоритм последовательно стандартизирует исходные данные, рассчитывает каждый фактор в виде отдельного растрового слоя, приводит все слои к единой системе координат, проекции и пиксельной сетке 30×30 м, после чего выполняет операцию $A = R \times K \times LS \times C \times P$ в среде Raster Calculator. На каждом этапе контролируются пространственный охват, диапазон значений и маска NoData, что обеспечивает арифметическую замкнутость и воспроизводимость расчёта другим исследователем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Бассейн Сангзарсай площадью 259 719,3 га характеризуется резкой пространственной дифференциацией условий формирования эрозии за счёт перепада высот от 402 до 3437 м и сопряжения горных, предгорных, адырных и равнинных ландшафтов.

2. Среднегодовая сумма осадков за 2000–2024 гг. составила 444,4 мм; доля весенних осадков (42,3%) совпадает с периодом неполного развития растительного покрова, что определяет сезонный характер эрозионного риска. Пространственные значения R-фактора варьировали в диапазоне 561,4–951,7.

3. К-фактор, рассчитанный для 28 почвенных контуров по данным 80 образцов механического анализа, варьировал в узком диапазоне 0,02193–0,02351 (среднее 0,022499); внутренняя согласованность расчёта подтверждена корреляциями $r(K, SIL) = +0,791$ и $r(K, CLA) = -0,800$.

4. Наибольшие значения LS-фактора сосредоточены на крутых предгорных склонах с высокой концентрацией стока; южные экспозиции характеризуются более высоким средним классом эрозии (2,69), чем северные (2,55).

5. Пастбища и богарные земли, занимающие 82,40% площади бассейна, определяют основной антропогенно-регулируемый компонент эрозионного риска через значения C-фактора (0,300 и 0,100 соответственно); разработанный интегральный геоинформационный алгоритм обеспечивает воспроизводимое совмещение факторов R, K, LS, C и P в единой растровой модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Апажев А.К. и др. Причины и последствия водной эрозии в условиях склоновых агроландшафтов // Сборник трудов Кабардино-Балкарского ГАУ. — 2017. — С. 1860.

2. Апажев А.К., Шекихачев Ю.А., Фиापшев А.Г. Анализ факторов, влияющих на возникновение и развитие эрозионных процессов на склоновых землях // Инновационная наука. — 2016. — № 3-3 (15). — С. 21–23.

3. Белолипский В.А., Полулях Н.Н. Фактические и допустимые показатели эрозионно-гидрологических процессов на вероятностной основе // Геоинформационное картографирование в регионах России. — 2020. — С. 62–70.
4. Гафуров А.М., Усманов Б.М. Оценка интенсивности и динамики почвенной эрозии методом наземного лазерного сканирования // Эрозионные, русловые и устьевые процессы. — 2016. — С. 81–90.
5. Гуламходжаева Ш.Ф. Создание противоэрозионных насаждений из ореха грецкого в Бричмуллинском лесном хозяйстве Ташкентской области // Science and innovation. — 2023. — Т. 2, № Спецвыпуск 11. — С. 15–21.
6. Джалилова Г.Т. Условия, определяющие опасность проявления водной эрозии в горных районах Узбекистана // Современные тенденции в научном обеспечении АПК Верхневолжского региона. — 2018. — С. 74–83.
7. Жидкин А.П., Голосов В.Н., Добрянский А.С. Оценка применимости цифровых моделей рельефа для моделирования эрозии почв (на примере малого водосбора в Курской области) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2021. — Т. 18, № 5. — С. 133–144.
8. Иванова Н.Н., Голосов В.Н. Оценка вклада катастрофических эрозионных событий в среднемноголетние темпы эрозии и аккумуляции в антропогенно-преобразованных ландшафтах // Современные проблемы эрозионных, русловых и устьевых процессов. — 2016. — С. 112–114.
9. Ковалев С.Н., Никольская И.И. Изменение структуры овражной эрозии на европейской территории России // Эрозия почв и русловые процессы. — 2019. — С. 76–94.
10. 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 им. В.В. Докучаева. — 2019. — № 100. — С. 5–35.

11. Куликов В.Ф., Шелухина О.А. Применение геоинформационных технологий в комплексных ландшафтных исследованиях // Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. Наука и образование. — 2019. — С. 488–495.

12. Лазовик Г.С., Топаз А.А. Оценка эрозионной опасности почв и её картографирование с использованием ГИС-технологий // Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология. — 2021. — № 2. — С. 18–31.

13. Мальцев К.А., Голосов В.Н., Гафуров А.М. Цифровые модели рельефа и их использование в расчётах темпов смыва почв на пахотных землях // Учёные записки Казанского университета. Серия Естественные науки. — 2018. — Т. 160, № 3. — С. 514–530.

14. Савельева Д.А., Каличкин В.К. Применение цифровых технологий при изучении водной эрозии почв Западной Сибири // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. — 2019. — Т. 49, № 4. — С. 86–100.

15. Тесленок К.С., Тесленок С.А., Фомин Н.М. Возможности использования ГИС-технологий для выявления потенциальных участков развития водной эрозии в производственно-хозяйственных системах // Стратегия и тактика развития отраслей экономики. — Гомель, 2019. — С. 164–166.

16. Шинкаренко С.С. и др. Эколого-хозяйственная оценка бассейна Сырдарьи с применением геоинформационных технологий // Природные системы и ресурсы. — 2017. — Т. 7, № 4. — С. 53–61.

17. Юферев В.Г., Ткаченко Н.А. Картографирование и моделирование агроландшафтов с использованием геоинформационных систем // Научно-агрономический журнал. — 2020. — № 4 (111). — С. 23–28.

18. Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., McCool D.K., Yoder D.C. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). — Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 703, 1997. — 404 p.

19. Wischmeier W.H., Smith D.D. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning. — Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 537, 1978. — 58 p.