

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 551.4.012

ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТА ДОСТАВКИ НАНОСОВ МАЛЫХ ВОДОСБОРОВ В ЛЕСОСТЕПНЫХ И СТЕПНЫХ РАЙОНАХ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ РАВНИНЫ

© 2019 г. Д. А. Безухов*, В. Н. Голосов, А. В. Панин

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия

*e-mail: dobrohuch@gmail.com

Поступила в редакцию 21.06.2018 г.; после доработки 31.10.2018 г.; принята в печать 04.04.2019 г.

Установлена зависимость между коэффициентом доставки наносов (SDR) и морфометрическими параметрами совокупности из 27 ранее изученных малых водосборов, находящихся в центральной и южной части Русской равнины в различных геоморфологических условиях в районах активного сельскохозяйственного освоения. Коэффициенты доставки наносов малых водосборов определялись с помощью полевых методов. При сопоставлении SDR с отдельными характеристиками рельефа выявлено отсутствие прямой линейной зависимости между каждым из параметров и SDR. Самое высокое значение коэффициента корреляции между коэффициентом доставки наносов и показателем рельефа малого водосбора получено для средней крутизны водосбора ($r = 0.52$). В качестве одной из проверяемых морфометрических характеристик использовалась характеристика плановой формы водосбора – коэффициент округлости. В полученное расчетное уравнение входит несколько морфометрических параметров: отношение площади и периметра, выведенное на основе коэффициента округлости, и амплитуда абсолютных высот. Эти показатели позволяют учитывать форму водосбора в плане и энергетический потенциал рельефа. Около половины значений SDR, полученные по расчетной формуле, отклоняются в пределах $\pm 10\%$ от исходных. Для водосборов с $SDR > 50\%$ расчетные значения значительно отличаются от исходных вследствие разброса данных в этой области. Полученная расчетная формула коэффициента доставки наносов может использоваться вместе с данными дистанционного зондирования о землепользовании для изучения динамики перераспределения наносов в речных бассейнах.

Ключевые слова: эрозия почв, доставка наносов, морфометрический анализ, Русская равнина, водосборный бассейн, параметры рельефа, коэффициент округлости, форма водосбора.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587-55662019473-84>

ВВЕДЕНИЕ

Эрозионно-аккумулятивные процессы являются ведущим фактором переноса твердого вещества в условиях гумидного климата. На территориях с интенсивным хозяйственным использованием, где происходит разрушение и преобразование почвенно-растительного покрова, объемы перераспределяемого вещества в результате действия эрозии значительно возрастают. Это проявляется в виде разнообразных хозяйственных и экологических последствий [7]. Например, в течение второй половины XX в. в результате эрозии почв общемировая площадь пахотных земель сократилась на одну треть, а среднегодовое сокращение площади пашни составляет порядка 10 млн га [25]. Благодаря процессам эрозии и аккумуляции происходит перераспределение вещества. В этом свете актуальной задачей является оценка объемов выносимых наносов из флювиальных систем освоенных территорий.

Интенсивность протекания эрозионно-аккумулятивных процессов определяется комплексом природных факторов, среди которых ведущую роль играет геоморфологическое строение. Особенно сильно возрастает влияние рельефа на процессы перераспределения наносов в лесостепной и степной зонах. Это связано с увеличением нормы поверхностного стока в флювиальных системах с малыми водосборами, что приводит к перегруженности речной сети наносами из верхних звеньев флювиальной сети [8]. Доля наносов, транспортируемая русловыми водными потоками, может быть оценена непосредственно по объемам вынесенного материала в устьевом створе. Однако основная масса наносов перераспределяется в пределах водосборных бассейнов верхних звеньев флювиальной сети – на склонах, в оврагах и балках. Поэтому прямое определение объемов материала, переносимого в речном бассейне, является весьма

трудоемкой задачей. Для ее решения существуют различные способы, одним из которых является использование коэффициента доставки наносов (*sediment delivery ratio* далее *SDR*), определяемый как соотношение между наносами, доставленными к устью (или любому створу) водосбора (в т/км² в год), к суммарному объему перемещенного на водосборе материала (в т/км² в год) [21, 29].

Данный коэффициент используется для определения доли наносов, вынесенных за пределы водосбора (относительно любого створа), к суммарному объему материала перемещенного различными процессами денудации на водосборе за любую единицу времени, начиная от эрозионного события и кончая периодом земледельческого освоения. Кроме того, он активно применяется при расчетах баланса наносов. Зная объем наносов, смытых с водосборных склонов в единицу времени, и величину коэффициента доставки, представляется возможным определить массу наносов, выносимых за пределы водосбора.

Вычисление *SDR* представляет собой трудность в силу нескольких причин. Одной из проблем является осреднение результатов измерения стока наносов и объемов эродированного материала по времени. Водосборы различного порядка и размера имеют различные темпы функционирования. В пределах малых водосборов процесс перераспределения наносов оценивается в пределах годовых циклов. Остается не до конца определенной роль единичных, но крупных эрозионных событий, которые очень сильно повышают вариабельность значений стока наносов, а, следовательно, и *SDR*, что порождает вопрос о корректности среднегодовых и среднесезонных показателей [24]. Кроме того, коэффициент доставки наносов сильно варьирует по сезонам в течение года, наибольшая его вариабельность наблюдается летом [14].

Вторым аспектом является проблема пространственного осреднения, связанная с исключительной неравномерностью процессов сноса и аккумуляции вещества. В особенности это заметно при вычислении *SDR* для водосборов различных размеров [28, 30]. Если рассматривается крупный речной бассейн, его звенья различных порядков будут поставлять наносы с различной интенсивностью. В таком случае возникает вопрос о целесообразности вычисления *SDR* для крупных бассейнов в принципе. При этом сам коэффициент может очень сильно варьировать от водосбора к водосбору даже в пределах одной относительно компактной области [17]. В связи с этим требуется сбор и обобщение большого количества эмпирического материала для каждого конкретного бассейна.

Многие исследователи в число параметров, определяющих *SDR*, включали различные морфометрические характеристики исследуемых водосборов, так как представляется возможным только на их основе рассчитать коэффициент доставки наносов. Так, в 1958 г. С. Мэнером [20] для природных условий штата Канзас установлена зависимость между коэффициентом доставки наносов и коэффициентом рельефа (отношение средней абсолютной высоты водосбора к амплитуде высот истока и устья главного водотока). Коэффициент рельефа в том или ином виде также использовался в других работах, посвященных изучению *SDR* [26, 31]. Кроме коэффициента рельефа водосбора в расчетах применялись следующие показатели: средняя длина водотоков [20], отношение коэффициента рельефа к средней длине водотоков [26, 31], площадь водосбора [26, 31], коэффициент бифуркации водотоков [19, 26], кривизна склонов [31]. Полученные соотношения основаны на регрессионном анализе статистической совокупности малых водосборов с известными коэффициентами доставки наносов. Некоторые исследователи предпринимали попытки связать коэффициент доставки с гидрологическими параметрами — уклоном главного водотока [23, 31] и среднегодовым слоем стока [22], а также с густотой овражной сети [18].

В 1980–1990-х была установлена обратная зависимость между площадью водосбора и коэффициентом доставки [9, 12, 17, 29]. С началом активного использования эмпирико-математических моделей для расчетов среднегодовых темпов смыва почвы появилась идея связать коэффициент доставки наносов с интегральным параметром длины и крутизны склона — *LS*-фактором [6], которая впервые используется в работах В. Ферро [15, 16] на примере водосборов о. Сицилия.

Независимо от этих исследований для 23 малых водосборов центральной и южной части Русской равнины, находящихся в различных природных условиях, полевыми методами были определены коэффициенты доставки наносов. Полученные значения показывают большие колебания коэффициента для водосборов площадью менее 100 км². По этим данным водосборы были разбиты на две группы: “накопители” (*SDR* < 50%) и “сбрасыватели” (*SDR* > 50%), для каждой группы получена регрессионная зависимость *SDR* от площади водосбора с высоким коэффициентом корреляции [3, 17].

Обзор публикаций по данной теме показывает, что на настоящий момент не в полной мере изучено влияние рельефа земной поверхности на перераспределение наносов в речном бассейне. Не установлено влияние отдельных морфометрических характеристик на коэффи-

циент доставки наносов. Рассмотренные в данных работах комплексные модели для количественной оценки доставки наносов нуждаются в калибровке. Наконец, отсутствует единая общепринятая модель оценки перераспределения наносов в речном бассейне.

Целью данного исследования является определение наиболее тесной зависимости коэффициента доставки наносов от набора морфометрических характеристик ранее изученных малых водосборов центральной и южной части Русской равнины.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для определения зависимости коэффициента доставки наносов малых водосборов от морфометрических параметров рельефа использовались результаты, полученные на основе проведения исследований с использованием набора полевых

и лабораторных методов, для 23 вышеуказанных водосборов [3], которые были дополнены данными о коэффициентах доставки по 4 малым водосборам в бассейне р. Плага [1, 4, 13] (табл. 1).

Все они расположены в центральной и южной частях Европейской территории России в диапазоне природных зон от лесостепи до сухой степи, в пределах различных геоморфологических провинций (рис. 1). Данные водосборы располагаются в зоне активного сельскохозяйственного освоения: площадь пахотных земель варьирует от 85 до 95%.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Определение коэффициента доставки разбивается на несколько этапов:

1) Сбор максимально большой совокупности малых водосборов с известными SDR для изучаемой территории.

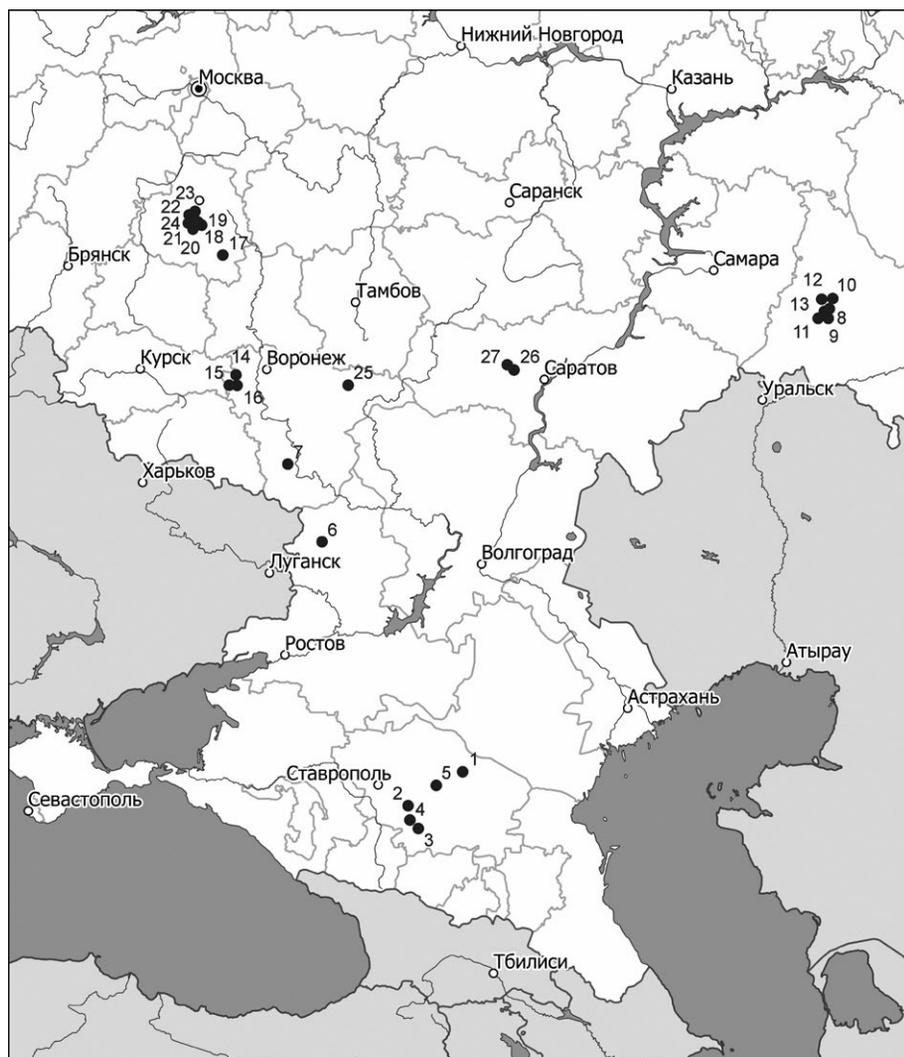


Рис. 1. Географическое положение малых водосборов. Нумерация водосборов соответствует табл. 1.

Таблица 1. Коэффициенты доставки для малых водосборов различных геоморфологических районов ЕТР

№	Водосбор	Площадь км ²	Речной бассейн	Геоморфологическая провинция [2]	SDR, %
1	Сухой Яр-I	21.6	р. Айгурка	Приволжско-Ставропольская	6
2	Сухой Яр-II	11.1	р. Калаус	—“”—	76
3	Терновая	8.5	р. Калаус	—“”—	85
4	Глубокий	4.2	р. Калаус	—“”—	95
5	Швединка	26	р. Калаус	—“”—	53
6	Приток Берестовой	1.89	р. Полная	Среднерусская	65
7	Марков ручей	142	р. Дон	—“”—	20
8	Погромка	224	р. Самара	Приуральская	2
9	Павельев Яр	76.7	р. Погромка	—“”—	9
10	Елховка	27.38	р. Погромка	—“”—	14
11	Долгий Яр	69.2	р. Погромка	—“”—	66
12	Грушин Лес	1.1	р. Погромка	—“”—	55
13	Крутой Яр	8.6	р. Погромка	—“”—	82
14	Репный	3.5	р. Ведуга	Среднерусская	83
15	Гнилище	17.2	р. Ведуга	—“”—	4
16	Ведуга	86.9	р. Дон	—“”—	1
17	Степин рукав	4.6	р. Турдей	—“”—	24
18	Святой источник	2.1	р. Плава	—“”—	79
19	Ляпуновка	6.2	р. Плава	—“”—	26
20	Верховья Локны	36.0	р. Локна	—“”—	7
21	Локна	179.0	р. Локна	—“”—	13
22	Часовенков Верх	42.1	р. Локна	—“”—	11
23	Приток Лапок	0.28	р. Локна	—“”—	24
24	Лапки	2.18	р. Локна	—“”—	12
25	Попов овраг	41.2	р. Савала	Окско-Донская	10
26	Ключи	8	р. Бол. Колышлей	—“”—	89
27	Ржавец	18	р. Бол. Колышлей	—“”—	9

Составлено по [3] с дополнениями.

2) Определение тех параметров рельефа, которые по отдельности оказывают наибольшее влияние на коэффициент доставки наносов с помощью расчета коэффициентов корреляции.

3) Определение зависимости SDR от морфометрических показателей путем нахождения эмпирического уравнения вида $SDR = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, где x_1, x_2, \dots, x_n — значения показателей с наибольшим коэффициентом корреляции.

Для каждого малого водосбора в системе ESRI ArcGIS 10.0 по цифровым моделям рельефа (ЦМР), построенным либо в результате векторизации топографических карт, либо по данным SRTM, вычислены основные морфометрические характеристики, которые потенциально могут влиять на SDR, а именно: пло-

щадь, периметр, абсолютная высота, крутизна, экспозиция, кривизна продольного и поперечного профилей, уклон днища, плановая форма водосбора, а также LS-фактор рельефа [6]. Данные параметры выбраны по следующим принципам:

— локальные морфометрические характеристики [11]: абсолютная высота, крутизна, экспозиция, кривизна продольного и поперечного профилей, уклон днища, LS-фактор — рассчитываются в пределах окрестности ячейки ЦМР [27];

— региональные морфометрические характеристики [11]: площадь, периметр — описывают положение природного объекта в ландшафте [27];

— характеристика плановой формы водосбора: коэффициент округлости [21].

Совокупность элементарных ячеек ЦМР, попавших в пределы каждого изучаемого водосбора, послужила основой для вычисления максимальных, минимальных и средних значений вышеперечисленных параметров. Например, средняя экспозиция водосбора рассчитывалась как среднее значение экспозиции определенное для каждой из ячеек ЦМР малого водосбора.

В качестве одной из морфометрических характеристик использовалась плановая форма водосбора, оцениваемая с помощью коэффициента округлости [21] – *circularity ratio* (k_c). Он равен отношению между площадью водосбора (F , км²) и площадью круга (S_o , км²), который имеет периметр, равный периметру исходного водосбора (P , км):

$$k_c = F / S_o \quad (1)$$

Физический смысл коэффициента округлости – соотношение площади водосбора с максимальной возможной площадью при том же периметре. Так как по законам евклидовой гео-

метрии любая плоская фигура при неизменном периметре не может иметь площадь, больше чем площадь круга, k_c всегда будет меньше единицы. Соотношение (1) можно преобразовать через площадь и периметр водосбора в соотношение:

$$k_c = 4\pi F / P^2. \quad (2)$$

Чем больше коэффициент округлости, тем ближе плановая форма водосбора приближается к окружности, а чем меньше, тем более вытянутую форму имеет водосбор (рис. 2).

Для количественной оценки влияния рельефа водосбора на долю выносимого через устьевой створ материала было необходимо определить степень линейной связи между морфометрическими характеристиками водосбора и коэффициентом доставки наносов. Это осуществлялось с помощью построения регрессионных уравнений вида $SDR = f(x)$, где x – значение какого-либо параметра, для каждого морфометрического показателя в отдельности, и вычисления коэффициента корреляции (в среде Microsoft Excel).

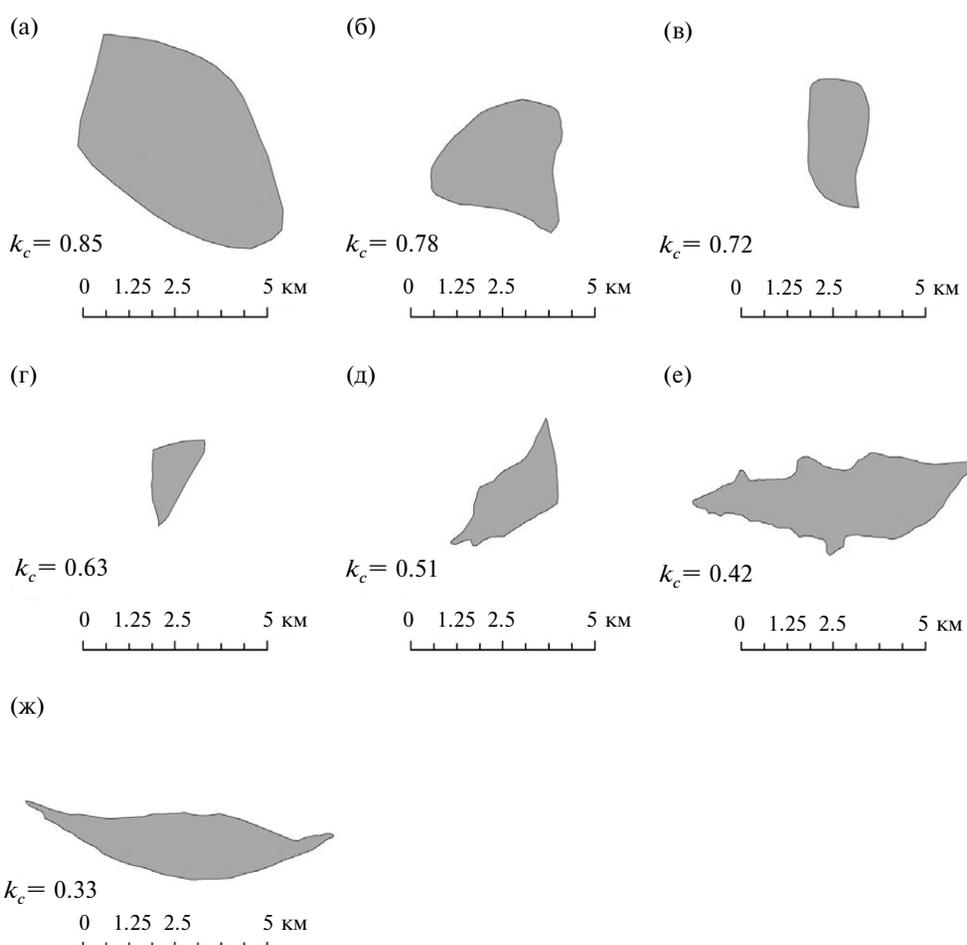


Рис. 2. Коэффициент округлости как характеристика плановой формы водосбора. Буквами обозначены малые водосборы: а – Сухой Яр-I, б – Крутой Яр, в – Степин рукав, г – Приток Берестовой, д – Глубокий, е – Сухой Яр-II, ж – Терновья.

Таблица 2. Коэффициенты линейной корреляции морфометрических характеристик водосборов и коэффициента доставки наносов

Морфометрическая характеристика водосбора	Коэффициент корреляции, r
Площадь	-0.444
Максимальная абсолютная высота	0.445
Минимальная абсолютная высота	0.420
Средняя абсолютная высота	0.455
Максимальная крутизна	0.187
Средняя крутизна	0.520
Средняя экспозиция	-0.095
Периметр	0.467
Максимальная кривизна продольного профиля	0.071
Минимальная кривизна продольного профиля	-0.089
Средняя кривизна продольного профиля	0.371
Максимальная кривизна поперечного профиля	-0.077
Минимальная кривизна поперечного профиля	0.077
Средняя кривизна поперечного профиля	0.484
Коэффициент округлости	-0.084
Средний уклон днища	0.281
Средний LS-фактор	0.360

Таким образом, определялись морфометрические характеристики, имеющие наибольшее влияние на коэффициент доставки наносов (табл. 2).

Самое высокое значение коэффициента корреляции между коэффициентом доставки наносов и показателем рельефа малого водосбора получено для средней крутизны водосбора ($r = 0.52$). Степень коррелятивной линейной связи с другими морфометрическими параметрами еще ниже. Исходя из этого, представляется возможным из нескольких базовых морфометрических характеристик составить выражение, имеющее более тесную связь с коэффициентом доставки наносов, чем эти характеристики по отдельности. Очевидно, что локальные морфометрические характеристики [11], основанные

на анализе дискретных ячеек ЦМР, такие, как средняя крутизна, не подходят для составления искомого выражения.

Искомое соотношение является функцией вида $f(F, P, H)$, где F – площадь водосбора (км^2), P – его периметр (км), H – абсолютная высота (м). Эти параметры выбраны как одни из наиболее сильно связанных с коэффициентом доставки наносов по отдельности (см. табл. 2). Кроме того, выдвинуто предположение, что при прочих равных условиях средний уклон водосбора оказывает наибольшее влияние на количество выносимых наносов за пределы водосбора. Средний уклон водосбора определяется как отношение амплитуды абсолютных высот к длине (прямая линия, соединяющая исток и устье) водосбора. На основе этого предположения можно заключить, что средний уклон водосбора можно выразить через площадные характеристики.

Пусть a – длина водосбора (км), тогда:

$$F = f(a), \text{ или } F \sim a. \quad (3)$$

Поэтому для водосбора идеально круглой формы:

$$S_o \sim a_o, \quad (4)$$

где a_o – диаметр круга, S_o – площадь круга (км^2), который имеет периметр, равный периметру исходного водосбора (P , км). В таком случае $a_o = 2R$ (R – радиус окружности).

Как установлено ранее, $F = k_c S_o$, где k_c – коэффициент округлости. Из этого следует, что $a \sim k_c(a_o)$, или:

$$a = k_c a_o. \quad (5)$$

Так как $a_o = 2R$, а $P_o = P = 2\pi R$, $a_o = P/\pi$, а с учетом вышеприведенного соотношения, получим:

$$a = k_c P/\pi. \quad (6)$$

Принимая коэффициент округлости равным $k_c = 4\pi F/P^2$, получим соотношение для длины водосбора:

$$a = 4F/P. \quad (7)$$

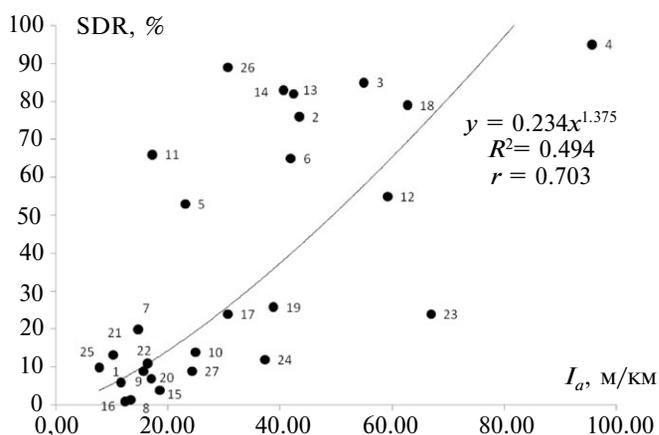
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследованная выше статистическая совокупность водосборов с известными коэффициентами доставки использовалась также для проверки полученных расчетных формул (табл. 3).

Из таблицы видно, что максимальные отклонения расчетных значений не превышают 33%, а в среднем их величины еще ниже. Надо учитывать, что при измерении линейных параметров возникает как неоднозначность их определения, так и стандартная инструментальная погрешность. Коэффициенты доставки, полученные

Таблица 3. Сравнение измеренной и рассчитанной длины водосборов

№	Водосбор	Максимальная длина, а, км		
		Измеренная	Расчетная	Отклонение, %
1	Сухой Яр-I	7.2	5.7	-21
2	Сухой Яр-II	7.2	5.8	-19
3	Терновая	8.5	5.7	-33
4	Глубокий	4.2	3.2	-24
5	Швединка	9.0	7.5	-17
6	Приток Берестовой	2.6	2.0	-23
7	Марков ручей	16.3	17.9	+10
8	Погромка	29.0	28.6	-1
9	Павельев Яр	13.1	11.0	-16
10	Елховка	10.4	10.2	-2
11	Долгий Яр	14.1	11.2	-21
12	Грушин Лес	1.8	1.5	-17
13	Крутой Яр	3.7	3.7	0
14	Репный	3.2	2.5	-22
15	Гнилище	6.3	5.2	-17
16	Ведуга	15.1	13.3	-12
17	Степин рукав	3.6	2.8	-22
18	Святой источник	2.4	2.0	-17
19	Ляпуновка	3.8	3.5	-8
20	Верховья Локны	11.8	10.0	-15
21	Локна	21.5	20.7	-4
22	Часовенков Верх	11.0	9.9	-10
23	Приток Лапок	0.9	0.7	-22
24	Лапки	2.0	2.0	0
25	Попов овраг	11.1	9.2	-17
26	Ключи	4.5	3.7	-18
27	Ржавец	6.9	5.4	-22

**Рис. 3.** Зависимость коэффициента доставки наносов от среднего уклона водосбора. По оси X – значения среднего уклона, по оси Y – значения коэффициента доставки. Цифрами обозначены порядковые номера водосборов, соответствующие табл. 1.

при проведении полевых исследований, также неизбежно имеют свои погрешности, так как это не данные прямых наблюдений, а величины, полученные на основе использования набора полевых и расчетных методов. Поэтому можно считать точность результатов применения расчетных формул удовлетворительной.

Средний уклон водосбора определяется как отношение амплитуды его абсолютных высот (ΔH , м) к его длине (a):

$$I_a = \Delta H/a. \quad (8)$$

С помощью построения регрессионных уравнений вида $SDR = f(I_a)$ и вычисления коэффициента корреляции установлена зависимость (рис. 3).

Соотношение $SDR \sim I_a$ имеет коэффициент корреляции примерно равный 0.7, что подразумевает высокую степень связи между коэффициентом доставки и средним уклоном водосбора. Как указано выше, $I_a = \Delta H/a$ и $a = 4F/P$, следовательно:

$$SDR \sim \Delta HP/4F. \quad (9)$$

Мы получили искомую зависимость коэффициента доставки наносов от группы основных морфометрических характеристик водосбора, которые по отдельности оказывают на него наибольшее влияние.

Используя полученное уравнение регрессии, можно определить расчетную формулу для коэффициента доставки наносов:

$$SDR = 0.234(\Delta HP/4F)^{1.375}. \quad (10)$$

Регрессионное уравнение (10) содержит в себе кроме площадной характеристики пока-

затели формы и потенциальной энергии (абсолютная высота).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Ранее полученные зависимости для водосборов двух групп – “накопители” ($SDR < 50\%$) и “сбрасыватели” ($SDR > 50\%$) (см. выше) имеют коэффициенты детерминации около 0.67 и достаточно хорошо подходят для расчетов ко-

эффициентов доставки исходной совокупности водосборов [3, 17]. Однако эти регрессионные уравнения построены на небольших выборках объемом 10 и 13 водосборов. По закону больших чисел средняя квадратическая ошибка среднего уменьшается как функция объема выборки [10], т.е. чем больше выборка, тем больше она подходит для статистических исследований. Выборки объемом менее 30 принято считать малыми [5]. Для таких выборок распределение погрешно-

Таблица 4. Сравнение расчетных и полученных полевыми методами величин коэффициента доставки наносов для малых водосборов

Водосбор	Величина коэффициента доставки наносов, полученная с помощью полевых методов, %	Расчетная величина коэффициента доставки наносов, %	Отклонение, %
Сухой Яр-I	6	7	+1
Сухой Яр-II	76	42	-30
Терновая	85	58	-27
Глубокий	95	122	+27
Швединка	53	18	-35
Приток Берестовой	65	40	-25
Марков ручей	20	10	-10
Погромка	2	9	+7
Павельев Яр	9	11	+2
Елховка	14	20	+6
Долгий Яр	66	12	-54
Грушин Лес	55	64	+9
Крутой Яр	82	41	-41
Репный	83	39	-44
Гнилище	4	14	+10
Ведуга	1	8	+7
Степин рукав	24	27	+3
Святой источник	79	69	-10
Ляпуновка	26	37	+11
Верховья Локны	20	12	-8
Локна	13	6	-7
Часовенков Верх	11	12	+1
Приток Лапок	24	76	+52
Лапки	12	35	+23
Попов овраг	10	4	-6
Ключи	89	27	-62
Ржавец	9	20	+11

стей зависит от распределения генеральной совокупности, а статистические оценки производятся с помощью специального распределения Стьюдента [5]. Поэтому малые выборки могут использоваться в качестве объектов регрессионного анализа, будучи объединенными в одну совокупность без разбиения на более мелкие группы. Кроме того, вышеупомянутые регрессионные уравнения в качестве входных данных используют только водосборную площадь, не учитывая потенциальную энергию и форму водосбора, которые, несомненно, могут оказывать существенное влияние на перераспределение наносов на водосборе и долю материала, которая может быть вынесена за его пределы.

Расчитанные по формуле 10 коэффициенты доставки наносов для изучаемых водосборов весьма близки к оценкам SDR, полученным на основе полевых оценок объемов смыва и аккумуляции при использовании крупномасштабного геоморфологического картирования, радиоцезиевого и почвенно-морфологических методов, а также расчетов темпов смыва по эрозионным моделям (табл. 4). Около половины расчетных значений отклоняются от значений, полученных полевыми методами, не более чем на $\pm 10\%$. При этом наиболее значительные отклонения наблюдаются для исходных коэффициентов доставки, как правило, превышающих 50%. Это связано со значительным разбросом исходных данных в этой области (см. рис. 3).

Независимые переменные, которые входят в расчетную формулу коэффициента доставки, отражают наиболее важные морфометрические характеристики водосбора: площадь в сочетании с периметром входят в расчетную формулу коэффициента округлости (формула 2), что позволяет учитывать плановую форму водосбора, а амплитуда высот характеризует энергетический потенциал рельефа. При этом коэффициент доставки обратно пропорционален площади [18, 21, 29]: чем больше площадь водосбора, тем меньше относительное количество материала, выносимого из него через устье. В предлагаемой формуле учтена и другая важная закономерность: чем больше амплитуда высот, тем больше количество материала, выносимого из устьевой части водосбора. Для равнинных территорий, где для водосборов сопоставимых размеров этот фактор несколько затушеван в связи с относительно малыми различиями амплитуд высот на малых водосборах, но в предгорьях и горах значимость данного фактора существенно возрастает (горные водосборы могут выносить до 100% материала, поступающего со склонов).

Для водосборов малой площади ($< 20 \text{ км}^2$) с коэффициентами доставки наносов более 70% расчетные данные оказываются значи-

тельно заниженными. Это связано с большим разнообразием геоморфологического строения данных водосборов и, прежде всего, со стадией формирования донных врезов в днищах долин, которая и определяет соотношение отложений, ранее отложившихся в днище и вынесенных за пределы водосбора за счет формирования донного вреза.

Для некоторых водосборов расчетное значение коэффициента доставки наносов превышает 100%. Это связано с недостаточным количеством объектов с коэффициентом доставки по данным полевых методов приближающимся к 100%, в результате чего расчетная формула для таких водосборов завышает расчетные значения. Доля таких объектов в общей совокупности не превышает 5%, все эти водосборы относятся ко второму порядку и имеют малую площадь. Коэффициент доставки наносов в данном случае является качественной характеристикой, отражая максимальную транзитность днищ долин водосборов, как правило, по всей длине прорезанных донным врезом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе приводится новый подход для расчета коэффициента доставки наносов. Предложенная расчетная формула имеет ряд преимуществ:

Для вычисления коэффициента доставки наносов использовались не только морфометрические (амплитуда высот, площадь, периметр), но и морфологические (форма водосбора в плане, выраженная через площадь и периметр) параметры рельефа водосбора.

Расчетное уравнение коэффициента доставки наносов может использоваться вместе с данными дистанционного зондирования о землепользовании для изучения динамики перераспределения наносов в речных бассейнах.

Стоит отметить, что для получения более точной зависимости коэффициента доставки от геоморфологического строения рельефа малого водосбора необходим больший объем статистической выборки природных объектов, исследованных полевыми методами. Ввиду трудоемкости получения такого статистического материала при расчетах SDR территориальный аспект учитывается только в мелком масштабе, так как все ранее исследованные водосборы находятся в пределах центральной и южной частей Европейской территории России в различных ландшафтно-климатических зонах и геоморфологических провинциях, из чего следует вывод о применимости полученной расчетной формулы к природным объектам, относящимся к данному региону.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безухов Д.А., Беляев В.Р., Иванова Н.Н. Количественная оценка интенсивности и направленности эрозионно-аккумулятивных процессов на обрабатываемых склонах в пределах бассейна р. Плава (Тульская область) // Вестн. Моск. гос. ун-та. Сер. 5. География. 2014. № 6. С. 16–23.
2. Геоморфологическое районирование (карта, м-б 1: 15 000 000) // Национальный атлас России. Т. 2. Природа и экология. 2007. С. 140–144.
3. Голосов В.Н. Эрозионно-аккумулятивные процессы в речных бассейнах освоенных равнин. М.: ГЕОС, 2006. 296 с.
4. Иванов М.М. Эрозионно-аккумулятивные процессы как фактор трансформации поля радиоактивного загрязнения бассейна р. Плавы. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2017. 139 с.
5. Ивановский Р.И. Теория вероятностей и математическая статистика. Основы, прикладные аспекты с примерами и задачами в среде Mathcad. СПб.: БХВ-Петербург, 2008. 528 с.
6. Ларионов Г.А. Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки. М.: Изд-во МГУ, 1993. 200 с.
7. Литвин Л.Ф. География эрозии почв сельскохозяйственных земель России. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2002. 255 с.
8. Маккавеев Н.И. Развитие эрозионных процессов в различных природных условиях // Н.И. Маккавеев. Эрозионно-аккумулятивные процессы и рельеф русла реки. М.: МГУ, 1998. 285 с.
9. Панин А.В., Иванова Н.Н., Голосов В.Н. Речная сеть и эрозионно-аккумулятивные процессы в бассейне Верхнего Дона // Водные ресурсы. 1997. Т. 24. № 6. С. 609–617.
10. Пузаченко Ю.Г. Математические методы в экологических и географических исследованиях: Учеб. пособие для студ. вузов. М.: Издательский центр “Академия”, 2004. 416 с.
11. Флоринский И.В. Теория и приложения математико-картографического моделирования рельефа. Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Пущино: ИМПБ РАН, 2010. 267 с.
12. Bagarello V., Baiamonte G., Ferro V., Giordano G. Evaluating the topographic factors for watershed soil erosion studies // Proc. Workshop on Soil Erosion in Semi-arid Mediterranean Areas. Taormina: CNR/European Society for Soil Conservation, 1993. P. 3–17.
13. Belyaev V., Shamshurina E., Markelov M., Golosov V., Ivanova N., Bondarev V., Paramonova T., Evrard O., Lio Soon Shun N., Otte C., Lefevre I., Bonte P. Quantification of river basin sediment budget based on reconstruction of the post-Chernobyl particle-bound 137Cs redistribution // IAHS Publ. Erosion and Sediment Yield in the Chaging Environment. Wallingford, Oxfordshire: IAHS Press, 2012. V. 356 P. 394–403.
14. Duijsings J. Seasonal variation in the sediment delivery ratio of a forested drainage basin in Luxembourg // Drainage Basin Sediment Delivery, IAHS Publication. 1986. V. 159. P. 153–164.
15. Ferro V., Minacapilli M. Sediment delivery processes at basin scale // Hydrol. Sci. J. 1995. V. 40. № 6. P. 703–717.
16. Ferro V., Porto P., Tusa G. Testing a distributed approach for modelling sediment delivery // Hydrol. Sci. J. 1998. V. 43. № 3. P. 425–442.
17. Golosov V.N., Ivanova N.N. Sediment-Associated Chernobyl 137Cs Redistribution in the Small Basins of Central Russia // Applied Geomorphology: Theory and Practice. John Wiley. Chichester. 2002. P. 165–181.
18. Jinze M., Qingmei M. Sediment delivery ratio as used in the computation of watershed sediment yield // J. of Hydrology (New Zealand). 1981. P. 27–38.
19. Horton R. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrological approach to quantitative morphology // Geol. Society of America Bul. 1945. V. 56. № 3. P. 275–370.
20. Maner S.B. Factors influencing sediment delivery rates in the Red Hills physiographic area // Tran. Am. Geophys. Union. 1958. V. 39. P. 669–675.
21. Miller V.C. A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in Clinic Mountain Area, Virginia and Tennessee // Technical report (Columbia University Department of Geology). NY. 1953. № 3. 125 p.
22. Mutchler C.K., Bowie A.J. Effect of land use on sediment delivery ratios. Proceedings of the Third Federal Inter-Agency Sedimentation Conference: Water Resources Council, Washington D.C. 1976. P. 11–12.
23. Onyado J.O., Kisoyan P., Chemelil M.C. Estimation of potential soil erosion for river Perkerra catchment in Kenya // Wat. Res. Manag. 2005. V. 19. № 2. P. 133–143.
24. Piest R.F., Kramer L.A., Heinemann H.G. Sediment movement from loessial watersheds // Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources. U.S. Dep. Agric. Publ. 1975. V. 40. P. 30–141.
25. Pimentel D., Harvey C. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits // Sci. 1995. V. 267. № 5201. P. 1117–1123.
26. Roehl J.W. Sediment source areas, delivery ratios and influencing morphological factors // Int. Assoc. of Sci. Hydrol. IAHS Publ. 1962. V. 59. P. 202–213.
27. Speight J.G. The role of topography in controlling throughflow generation: a discussion // Earth Surf. Process. 1980. V. 5. № 2. P. 187–191.
28. Van Rompaey A.J.J., Verstraeten G., Van Oost K., Govers G., Poesen J. Modeling mean annual sediment yield using a distributed approach // Earth Surf. Process and Landforms. 2001. V. 26. № 11. P. 1221–1236.
29. Walling D.E. The sediment delivery problem // J. of Hydrol. 1983. V. 65. № 1–3. P. 209–237.
30. Walling D.E., Webb B.W. Patterns of sediment yield // Background to paleohydrology. Chichester: Wiley, 1983. P. 149–176.
31. Williams J.R. Sediment delivery ratios determined with sediment and runoff models. IAHS Publ. 1977. V. 122. P. 168–179.

REFERENCES

1. Bezukhov D.A., Belyaev V.R., Ivanova N.N. Quantitative assessment of intensity and trends of erosion and accumulation processes on cultivated slopes within the Plava river basin (the Tula oblast). *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2014, no. 6, pp. 16–23. (In Russ.).

2. Geomorphic zoning (map, scale 1:15000000). In *Natsional'nyi atlas Rossii* [National Atlas of Russia], vol. 2: *Priroda i ekologiya* [Environment (Nature). Ecology]. Moscow: Kartografiya Publ., 2007, pp. 140–144. (In Russ.).
3. Golosov V.N. *Eroziionno-akkumulyativnye protsessy v rechnykh basseynakh osvoennykh ravnin* [Erosion-Accumulative Processes in the River Basins on the Cultivated Plains]. Moscow: GEOS Publ., 2006. 296 p.
4. Ivanov M.M. Erosion and accumulative processes as a factor of nuclear fallout field transformation of the Plava river basin. *Extended Abstract of Cand. Sci. (Geogr.) Dissertation*. Moscow: Moscow State Univ., 2017. 139 p.
5. Ivanovskii R.I. *Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika. Osnovy, prikladnye aspekty s primerami i zadachami v srede Mathcad* [The Theory of Probability and Mathematical Statistics. Basics, Applied Aspects with Examples and Tasks in the Mathcad Environment.]. St. Petersburg: BKhV-Peterburg Publ., 2008. 528 p.
6. Larionov G.A. *Eroziya i deflyatsiya pochv: osnovnye zakonomernosti i kolichestvennye otsenki* [Soil Erosion and Deflation: Main Patterns and Qualitative Assessments]. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 1993. 200 p.
7. Litvin L.F. *Geografiya erozii pochv sel'skokhozyaystvennykh zemel' Rossii* [Geography of Russian Agricultural Lands's Soil Erosion]. Moscow: Akademkniga Publ., 2002. 255 p.
8. Makkaveyev N.I. *Eroziionno-akkumulyativnye protsessy i rel'ef rusla reki. Izbrannye trudy* [Erosion-accumulation Processes and River Bed Relief. Selected Works.]. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 1998. 285 p.
9. Panin A.V., Ivanova N.N., Golosov V.N. The river network and the processes of erosion and accumulation in the Upper Don basin. *Water Resour.*, 1997, vol. 24, no. 6, pp. 609–617.
10. Puzachenko Y.G. *Matematicheskie metody v ekologicheskikh i geograficheskikh issledovaniyakh* [Mathematical Techniques in Ecological and Geographical Studies]. Moscow: Akademiya Publ., 2004. 416 p.
11. Florinsky I.V. Theory and applications of mathematical-cartographic terrain modelling. *Cand. Sci. (Tech.) Dissertation*. Pushchino: Inst. Math. Probl. Biol., Russ. Acad. Sci., 2010. 267 p.
12. Bagarello V., Baiamonte G., Ferro V., Giordano G. Evaluating the topographic factors for watershed soil erosion studies. In *Proc. Workshop on Soil Erosion in Semi-arid Mediterranean Areas*. Taormina: CNR/European Society for Soil Conservation, 1993, pp. 3–17.
13. Belyaev V., Shamshurina E., Markelov M., Golosov V., Ivanova N., Bondarev V., Paramonova T., Evrard O., Lio Soon Shun N., Otle C., Lefevre I., Bonte P. Quantification of river basin sediment budget based on reconstruction of the post-Chernobyl particle-bound ¹³⁷Cs redistribution. In *Erosion and Sediment Yield in the Chaging Environment*, vol. 356 of IAHS Publ. Wallingford, Oxfordshire, 2012, pp. 394–403.
14. Duijsings J. Seasonal variation in the sediment delivery ratio of a forested drainage basin in Luxembourg. In *Drainage Basin Sediment Delivery*, vol. 159 of IAHS Publication. 1986, pp. 153–164.
15. Ferro V., Minacapilli M. Sediment delivery processes at basin scale. *Hydrolog. Sci. J.*, 1995, vol. 40, no. 6, pp. 703–717.
16. Ferro V., Porto P., Tusa G. Testing a distributed approach for modelling sediment delivery. *Hydrolog. Sci. J.*, 1998, vol. 43, no. 3, pp. 425–442.
17. Golosov V.N., Ivanova N.N. Sediment-associated Chernobyl ¹³⁷Cs redistribution in the small basins of Central Russia. In *Applied Geomorphology: Theory and Practice*. Allison R.J., Ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2002, pp. 165–181.
18. Jinze M., Qingmei M. Sediment delivery ratio as used in the computation of watershed sediment yield. *J. Hydrol. (New Zealand)*, 1981, vol. 20, no. 1, pp. 27–38.
19. Horton R. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrological approach to quantitative morphology. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1945, vol. 56, no. 3, pp. 275–370.
20. Maner S.B. Factors influencing sediment delivery rates in the Red Hills physiographic area. *Eos, Trans. Am. Geophys. Union*, 1958, vol. 39, no. 4, pp. 669–675.
21. Miller V.C. *A Quantitative Geomorphic Study of Drainage Basin Characteristics in Clinch Mountain Area, Virginia and Tennessee*, vol. 3 of Technical Report (Columbia University Department of Geology). New York, 1953. 125 p.
22. Mutchler C.K., Bowie A.J. Effect of land use on sediment delivery ratios. In *Proc. of the Third Federal Inter-Agency Sedimentation Conf.* Washington D.C.: Water Resources Council, 1976, pp. 11–12.
23. Onyado J.O., Kisoyan P., Chemelil M.C. Estimation of potential soil erosion for river Perkerra catchment in Kenya. *Water Resour. Manag.*, 2005, vol. 19, no. 2, pp. 133–143.
24. Piest R.F., Kramer L.A., Heinemann H.G. Sediment movement from loessial watersheds. In *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources*, vol. 40 of U.S. Dep. Agric. Publ. 1975, pp. 30–141.
25. Pimentel D., Harvey C. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science*, 1995, vol. 267, no. 5201, pp. 1117–1123.
26. Roehl J.W. Sediment source areas, delivery ratios and influencing morphological factors. In *Land Erosion (Proc. of the Bari Symposium)*, vol. 59 of IAHS Publ. 1962, pp. 202–213.
27. Speight J.G. The role of topography in controlling throughflow generation: a discussion. *Earth Surf. Process.*, 1980, vol. 5, no. 2, pp. 187–191.
28. Van Rompaey A.J.J., Verstraeten G., Van Oost K., Govers G., Poesen J. Modeling mean annual sediment yield using a distributed approach. *Earth Surf. Process. Landf.*, 2001, vol. 26, no. 11, pp. 1221–1236.
29. Walling D.E. The sediment delivery problem. *J. Hydrol.*, 1983, vol. 65, no. 1–3, pp. 209–237.
30. Walling D.E., Webb B.W. Patterns of sediment yield. In *Background to Paleohydrology: A Perspective*. Gregory K., Ed. Chichester: Wiley, 1983, pp. 149–176.
31. Williams J.R. Sediment delivery ratios determined with sediment and runoff models. In *Erosion and Solid Matter Transport in Inland Waters*, vol. 122 of IAHS Publ. 1977, pp. 168–179.

Evaluation of the Sediment Delivery Ratio of Small Watersheds in the Forest-Steppe and Steppe Regions of The Russian Plain

D. A. Bezukhov*, V. N. Golosov, and A. V. Panin

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

**e-mail: dobrohuch@gmail.com*

Received June 26, 2018; revised October 31, 2018; accepted April 4, 2019

Dependence between sediment delivery ratio (SDR) and morphometric parameters of a set of 27 previously studied small watersheds located in the central and southern parts of the Russian plain in various geomorphological conditions in the areas of active agricultural development is established. The SDR of small watersheds were determined using field methods. When comparing the SDR with individual terrain characteristics, there is no direct linear relationship between each of the parameters and SDR. The highest value of the correlation coefficient between the SDR and relief indicators of the small watershed was obtained for the average steepness of the watershed area ($r = 0.52$). As one of the verified morphometric characteristics, the parameter of the planimetric form of the watershed area (the circularity coefficient) was used. The resulting equation includes several morphometric parameters: the ratio of area and perimeter (derived from the circularity coefficient) and the amplitude of absolute heights. These parameters allow taking into account the watershed planimetric form and the landform energy potential. About half the SDR values, obtained by the equation, deviate within $\pm 10\%$ of the initial values. For watersheds with $SDR > 50\%$, the calculated values are significantly different from the initial values due to the spread of data in this area. The obtained equation of SDR can be used together with land-use remote sensing data to study the dynamics of sediments redistribution in river basins.

Keywords: soil erosion, sediment delivery, morphometric analysis, Russian plain, river drainage basin, relief parameters, circularity coefficient, basin shape.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587-55662019473-84>