

А.В. Гусаров, В.В. Мозжерин

Казанский (Приволжский) федеральный университет

Антропогенное усиление бассейновой составляющей стока взвешенных наносов равнинных рек Северной Евразии¹

Впервые вопрос о расчленении стока наносов на русловую и бассейновую составляющие поставил Б.В. Поляков [1946]. Им же был предложен метод такого расчленения, основанный на анализе хронологического графика мутности аналогично генетическому расчленению гидрографа водного стока. К русловой составляющей стока взвешенных наносов относится мутность за весь меженный период, исключая половодье и дождевые паводки, мутность которых срезается на графике и считается бассейновой. Метод Б.В. Полякова был значительно усовершенствован в работе О.В. Щегловой [1984].

Основная сложность применения метода заключается в построении детального временного графика мутности за достаточно большое количество лет и неопределенностью линии срезки мутности во время подъемов воды. Применяемый в большинстве случаев вариант соединения прямой линией значений мутности до и после подъема воды автоматически подразумевает неизменность величины русловых размывов, хотя хорошо известно [Маккавеев, Чалов, 1986], что при прохождении больших расходов происходит наиболее интенсивное переформирование русла реки. Таким образом, русловой размыв, оцениваемый по величине мутности, заведомо оказывается заниженным, а доля бассейновых продуктов – завышенной. Сущность способа принципиально не изменится, если подобное расчленение проводить по хронологическому графику расхода взвешенных наносов, поскольку значения расходов наносов связаны функциональной зависимостью с мутностью речных вод.

В развитие идей Б.В. Полякова и О.В. Щегловой А.П. Дедковым и В.И. Мозжериным [1984] был разработан новый метод приближенной количественной оценки величины русловой эрозии, основанный на анализе зависимости стока взвешенных наносов от меженных расходов воды в разные по меженной водности годы. Между меженными расходами воды и наносов существует тесная корреляционная связь, близкая к прямолинейной. По уравнению регрессии, связывающему меженные расходы воды и наносов, можно определить тот расход наносов, который соответствует известному среднегодовому расходу воды и обусловлен лишь эрозией в русле реки. Вычитая расход взвешенных наносов руслового происхождения из его общей годовой величины, можно найти расход наносов, характеризующий эрозию талых и дождевых вод в речном бассейне [Мозжерин, 1994; Мозжерин, Курбанова, 2004].

Этот способ менее трудоемок по сравнению с предыдущим, но также далек от совершенства, поскольку происходит экстраполяция связи меж-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 11-05-00489 и 11-05-00605).

ду меженными расходами воды и наносов до среднегодовых значений без учета ее нелинейности [Н.И. Маккавеев, 1955]. Очевидно, что наиболее точные результаты этот метод будет обеспечивать в лесной зоне, где среднегодовые расходы воды ненамного превосходят самые высокие срочные или суточные расходы межени. В других природных зонах с повышением внутригодовой неравномерности жидкого стока надежность определения русловой эрозии снижается. Кроме того, этим методом не удастся учесть возрастание размывающей способности потока в половодье, поскольку допускается, что связи между расходами воды и наносов, установленные для межени, действуют в течение всего года. Следовательно, доля русловых продуктов оказывается систематически заниженной [Мозжерин, 1994].

Для оценки увеличения бассейновой составляющей в стоке взвешенных наносов равнинных рек Северной Евразии нами первоначально были определены соотношения русловой и бассейновой составляющих в антропогенно ненарушенных речных бассейнах. Для этой цели выбраны 43 реки, располагающиеся в различных природных (ландшафтных) зонах равнин бывшего СССР, территория которого обеспечена опубликованными материалами непосредственных наблюдений за стоком воды и стоком наносов на гидрологических постах и станциях (табл. 1).

Главными критериями для их выбора послужили несколько факторов. Во-первых, для анализа были привлечены средние реки, площадь бассейна которых находится в интервале одной – десяти тысяч квадратных километров. В настоящее время можно считать доказанным, что именно средние реки наилучшим образом передают зональные особенности, тогда как малые реки (с площадью менее 1 000 км²) слишком чувствительны к местным факторам (составу пород, орографии, микроклимату и ландшафтными особенностям), а крупные реки, бассейны которых располагаются в нескольких природных зонах, нивелируют зональные особенности [Сток наносов..., 1977].

Второй фактор, на основе которого проводился отбор рек, – степень измененности поверхности водосбора хозяйственной деятельностью, в первую очередь агрикультурной. Для анализа оставлены лишь те реки, в бассейне которых не менее чем на 70 % площади сохранились природные ландшафты (1 категория освоенности по А.П. Дедкову и В.И. Мозжерину [1984]). Наконец, дополнительными ограничивающими условиями стали продолжительность наблюдения (оставлены лишь реки, обеспеченные не менее чем пятилетними наблюдениями) и равнинный рельеф их водосборов.

Видно, что привлеченные к анализу реки распределены по природным зонам очень неравномерно: наибольшее их количество приходится на тайгу и полупустыни умеренного пояса, территории которых слабо изменены деятельностью человека. Зоны широколиственных лесов, степи и лесостепи, территории которых имеют долгую историю сельскохозяйственного освоения, обеспечены значительно меньшим числом рек, бассейны которых удовлетворяют приведенным выше условиям.

Таблица 1

Распределение антропогенно ненарушенных речных бассейнов и стока взвешенных наносов рек по природным зонам, по которым проводились расчленение

Природная зона	N	t , лет	S , тыс. км ²	H , м	Q_1 , л/с·км ²	R_1 , т/км ² ·год
Тундра и лесотундра	2	$\frac{10}{7-12}$	$\frac{1,24}{1,00-1,48}$	$\frac{390}{370-410}$	$\frac{9,5}{4,0-15,0}$	$\frac{18,0}{4,1-32,0}$
Тайга	19	$\frac{12}{5-33}$	$\frac{4,61}{1,17-8,87}$	$\frac{363}{100-770}$	$\frac{7,0}{1,7-18,0}$	$\frac{8,9}{0,4-51,0}$
Широколиственный лес	2	$\frac{12}{10-13}$	$\frac{3,92}{1,60-6,25}$	160	$\frac{4,2}{3,2-5,3}$	$\frac{3,2}{2,9-3,5}$
Лесостепь	2	$\frac{10}{8-11}$	$\frac{5,18}{3,91-6,44}$	140	$\frac{0,9}{0,8-1,0}$	$\frac{1,0}{0,9-1,2}$
Степь	1	21	1,75	395	1,6	9,1
Полупустыня умеренного пояса	17	$\frac{13}{5-24}$	$\frac{4,10}{1,04-9,86}$	$\frac{633}{80-964}$	$\frac{0,8}{0,1-1,4}$	$\frac{2,9}{0,6-5,8}$

Примечание. N – количество пунктов наблюдения, T – период наблюдения за стоком наносов, S – площадь бассейна, H – средняя высота бассейна, Q_1 – модуль стока воды в антропогенно ненарушенных бассейнах, R_1 – то же стока взвешенных наносов. В числителе дроби – средние значения, первое число знаменателя дроби – минимальное значение, второе число знаменателя дроби – максимальное значение.

Результаты расчленения стока взвешенных наносов рек, протекающих в неизмененных человеком условиях, представлены в таблице 2. Выделение доли русловой и бассейновой составляющих проводилось обоими основными методами – расчленением гидрографа среднемесячных значений стока взвешенных наносов и экстраполяцией связи между межгодовыми значениями стока воды и стока наносов до среднегодовых значений стока воды. Поскольку оба метода являются равноценными по точности, за окончательную величину доли русловой и бассейновой составляющих принята средняя величина. Как видно из таблицы 2, оба метода дают в целом сопоставимые результаты (коэффициент прямолинейной корреляции равен 0,91), при этом в первом методе интервал изменения значений ω_1 оказывается уже (рис. 1). Несовпадение оценок связано, прежде всего, с ограниченностью исходной выборки. Так, для степной зоны, представленной всего лишь одним бассейном, разброс значений составил почти 50 % от средней величины (доверительный интервал 95 %-ной вероятности безошибочного прогноза охватывает диапазон значений 0 – 90 %), а сама доля бассейновой составляющей оказалась сравнима с полупустыней (табл. 2).

Таблица 2

Доля русловой составляющей стока взвешенных наносов в речных бассейнах слабоизмененных человеком различных природных зон равнин Северной Евразии

Природная зона	1 метод		2 метод		Среднее значение ω_1 , %
	N	ω_1 , %	N	ω_1 , %	
Тундра и лесотундра	2	$\frac{36}{30-41}$	2	$\frac{41}{30-52}$	38±15
Тайга	14	$\frac{61}{51-85}$	14	$\frac{72}{50-100}$	66±6
Широколиственный лес	2	$\frac{76}{74-77}$	2	$\frac{76}{66-86}$	76±11
Лесостепь	2	$\frac{42}{34-51}$	2	$\frac{26}{21-32}$	34±17
Степь	1	19	1	46	32±58
Полупустыня умеренного пояса	17	$\frac{19}{8-26}$	8	$\frac{11}{0-23}$	16±3

Примечание. 1 метод – расчленение гидрографа стока взвешенных наносов; 2 метод – экстраполяция связи между межзональными расходами воды и взвешенных наносов до годового стока воды; ω_1 – доля русловой составляющей стока взвешенных наносов в природных (неосвоенных и слабоосвоенных) бассейнах. В числителе дроби – средние значения, первое число знаменателя дроби – минимальное значение, второе число знаменателя дроби – максимальное значение. В последней графе после знака «±» – доверительный 95 %-ный интервал безошибочного прогноза средней величины.

Из таблицы 2 видно, что наибольшую роль в формировании стока наносов русловые размывы играют в лесной зоне (средние значения 66 – 76 % объема наносов). Сомкнутый растительный покров этих зон, препятствует любым проявлениям механической денудации на речных водосборах, являющихся в этом смысле эрозионно малопродуктивными. К северу и к югу от лесной зоны по мере сокращения площади древесной растительности доля продуктов бассейновой денудации возрастает, достигая максимума в зоне полупустынь, где их доля в стоке наносов (более 80 %) в 3 раза выше, чем в лесных ландшафтах.

В антропогенно освоенных бассейнах исходные природные зависимости претерпевают серьезные нарушения. Антропогенная (в первую очередь агрикультурная) деятельность модифицирует природные спектры экзогенных процессов, многократно усиливает процессы денудации на поверхности речных бассейнов и смещает соотношение русловых и бассейновых продуктов стока взвешенных наносов в пользу бассейновой эрозии. Для количественной оценки увеличения доли бассейновой составляющей нами выбраны речные бассейны площадью от 1 до 10 тыс. км² различной освоенности, располагающиеся на равнинах Северной Евразии, по которым име-

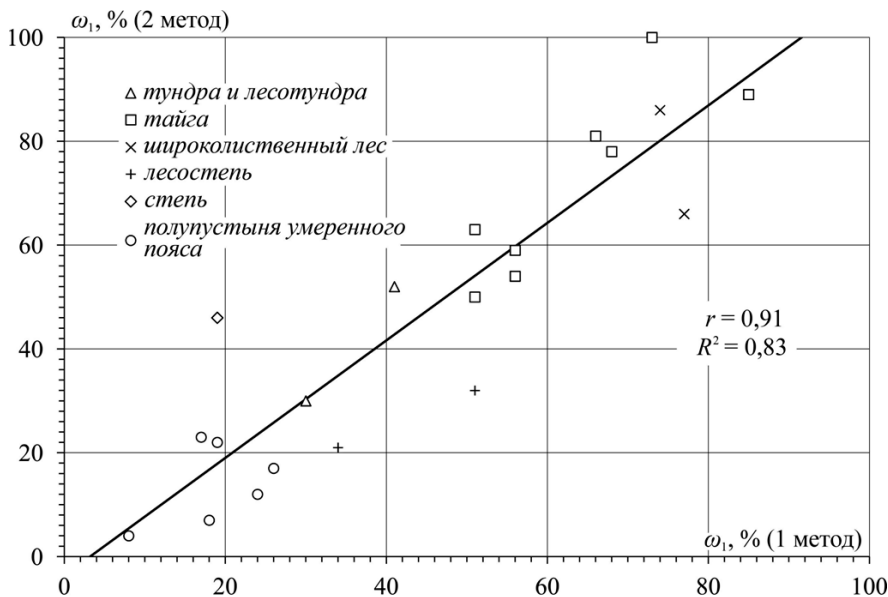


Рис. 1. График корреляции между значениями доли продуктов русловых размывов в естественных условиях природных зон равнин, рассчитанными расчленением графиков мутности (1 метод) и экстраполяцией связи между меженными значениями стока воды и наносов до годовых величин стока воды (2 метод)

r – коэффициент прямолинейной корреляции;
 R^2 – коэффициент достоверности аппроксимации

ются наблюдения за стоком взвешенных наносов продолжительностью не менее 5 лет.

По степени антропогенной (сельскохозяйственной) освоенности природных ландшафтов все бассейны можно разделить на 3 категории [Дедков, Мозжерин, 1984]. Категория 1 объединяет неосвоенные и слабоосвоенные бассейны, распаханность которых составляет менее 30 %, а остаточная лесистость в лесных ландшафтах более 70 %. Категория 2 охватывает бассейны средней освоенности (распаханность и залесенность меняются от 30 до 70 %). В 3 категорию попадают сильноосвоенные бассейны, в которых распаханность и остаточная залесенность составляют более 70 % и менее 30 % соответственно.

Для оценки усиления доли бассейновой составляющей в стоке взвешенных наносов рек, бассейны которых в разной степени изменены человеком, мы исходили из двух предпосылок (допущений). Во-первых, между долей русловых продуктов и общей величиной стока наносов устанавливается обратная гиперболическая зависимость (рис. 2): при относительно малых модулях стока наносов доля русловых продуктов может быть самой различной, но при большом стоке наносов эта доля резко снижается

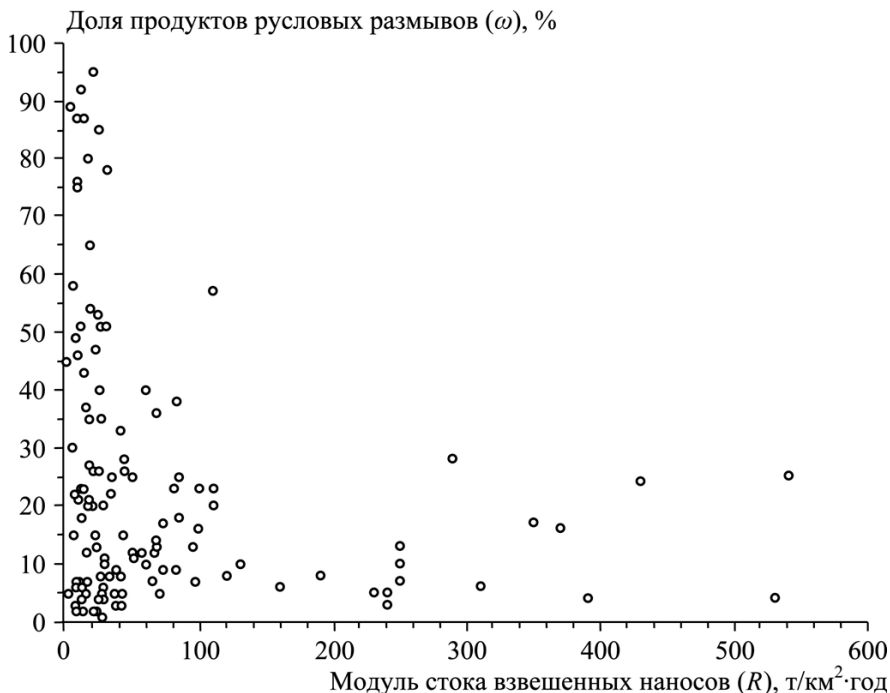


Рис. 2. Связь доли продуктов русловой эрозии с общей величиной стока взвешенных наносов в различных природных зонах равнин Земли (по В.И. Мозжерину [1994])

[Мозжерин, 1994; Мозжерин, Курбанова, 2004]. Иными словами, сколько-нибудь заметное возрастание величины стока наносов, происходящее при смене природных зон и повышении категории антропогенной освоенности, осуществляется главным образом за счет усиления бассейновой компоненты. Следовательно, весь прирост в величине стока взвешенных наносов в освоенных бассейнах можно в первом приближении полностью соотнести с бассейновой составляющей.

Вторая предпосылка основана на существовании прямой связи между модулями стока воды и модулями стока наносов в русловых системах эрозии [Дедков и др., 2001, 2008]: возрастанию значений модуля водного стока на равнинах соответствует повышение модулей стока наносов пропорционально квадрату расходов воды [Маккавеев, 1955]. Таким образом, для известных значений модуля стока воды Q всегда можно прогнозировать тот объем стока наносов, который формируется за счет одних лишь русловых размывов, R' :

$$R' = \left(\frac{Q}{Q_1} \right)^2 \cdot R'_1, \quad [1]$$

где Q_1 и R'_1 – модуль стока воды и модуль стока взвешенных наносов соответственно в антропогенно ненарушенных бассейнах. Величина R'_1 может быть получена из:

$$R'_1 = \omega_1 R_1. \quad [2]$$

Отсюда легко вычислить долю русловой составляющей в речных бассейнах любой категории освоенности ω :

$$\omega = \frac{R'}{R}, \quad [3]$$

где R – модуль стока взвешенных наносов в освоенных бассейнах, остальные обозначения пояснены выше. Переход от модульных коэффициентов к абсолютным показателям (например, мутности речных вод, расходу или объему наносов), не меняет полученного результата.

Конечно, указанный способ является приблизительным; для более точной оценки необходимо расчленение гидрографов мутности (стока взвешенных наносов) или экстраполяция связи между меженными расходами воды и наносов (как это было сделано для природных бассейнов; табл. 2) для всех бассейнов, а не только для антропогенно ненарушенных. Однако эта задача на данный момент представляется сложной ввиду многочисленности самих бассейнов. Вместе с тем, принимая во внимание приблизительность самих методов выделения русловой и бассейновой составляющей, использование уравнения [3] дает результаты, вполне сопоставимые с ними по точности. Результаты вычислений приведены в таблице 3.

Из таблицы видно, что увеличение сельскохозяйственной освоенности поверхности речных бассейнов приводит к неуклонному росту как общей величины стока взвешенных наносов, так и доли бассейновой составляющей в нем. Особенно интенсивные сокращения доли русловой составляющей ω (20 – 30-кратные) при переходе от 1 к 3 категории освоенности наблюдаются в лесных ландшафтах. Менее масштабны, но все так же заметны (1,5 – 2,5-кратные) сокращения той же доли в безлесных природных зонах.

Фактические преувеличение доли бассейновой составляющей в речных бассейнах равнин Северной Евразии по сравнению с бассейнами 1 категории целиком определяются средней категорией освоенности природных зон (табл. 4). Наименьшей агрикультурной освоенностью обладает зона тундр и лесотундр (средняя категория освоенности бассейнов этой зоны составляет 1,0). При этом доля бассейновой составляющей в стоке взвешенных наносов рек этой зоны, по-видимому, даже меньше ее расчетной величины (табл. 2). Столь же низкой освоенностью отличаются бассейны рек таежной и полупустынной зон. Как следствие, отношение доли бассейновой составляющей в стоке взвешенных наносов этих рек близко к той же доле в стоке рек, бассейны которых слабо освоены человеком. Наибольшая средняя категория освоенности характерна для зоны широколиственных лесов, а также степной и лесостепной зон (2,5 – 2,7). Здесь же отмечаются наиболь-

Таблица 3

Доля русловой составляющей стока взвешенных наносов в речных бассейнах равнин Северной Евразии различной категории освоенности и ландшафтной принадлежности

Природная зона	A	N	Q, л/с·км ²	R, т/км ² ·год	R', т/км ² ·год	ω, %
Тундра и лесотундра	1	3	10,7	12,8	7,7	68
Тайга	1	65	7,5	6,4	6,3	100
	2	58	6,3	8,5	5,3	56
	3	16	5,5	66,0	4,4	5
Широколиственный лес	1	2	4,2	3,2	2,4	75
	2	21	6,0	14,1	3,5	35
	3	55	5,0	138,8	2,9	2
Лесостепь	1	2	0,9	1,0	0,3	30
	2	15	3,2	14,3	1,2	30
	3	18	3,5	41,2	1,3	12
Степь	1	1	1,6	9,1	2,9	31
	2	28	1,7	18,1	3,1	18
	3	41	2,0	25,5	3,6	18
Полупустыня умеренного пояса	1	20	0,7	2,7	0,4	14
	2	5	1,3	8,7	0,8	14

Примечание. A – категория антропогенной (агркультурной) освоенности речных бассейнов по А.П. Дедкову и В.И. Можжерину [1984]; N – число бассейнов, Q – среднее значение модуля стока воды, R – то же стока взвешенных наносов, R' – то же стока взвешенных наносов руслового происхождения, полученное из уравнения [1], ω – средняя доля продуктов руслового происхождения в общей величине стока наносов (уравнение [3]).

Таблица 4

Соотношение осредненных по природным зонам доли русловой и бассейновой составляющих в речных бассейнах равнин Северной Евразии

Природная зона	N	A	Q, л/с·км ²	R, т/км ² ·год	ω, %	(100 – ω), %	$\frac{(100 - \omega)}{(100 - \omega_1)}$
Тундра и лесотундра	3	1,0	10,7	12,8	68	32	0,52
Тайга	139	1,6	6,7	14,1	71	29	0,85
Широколиственный лес	78	2,7	5,2	101,8	13	87	3,62
Лесостепь	35	2,5	3,2	51,8	21	79	1,20
Степь	70	2,6	1,9	22,3	18	82	1,21
Полупустыня умеренного пояса	25	1,2	0,8	3,9	15	85	1,01

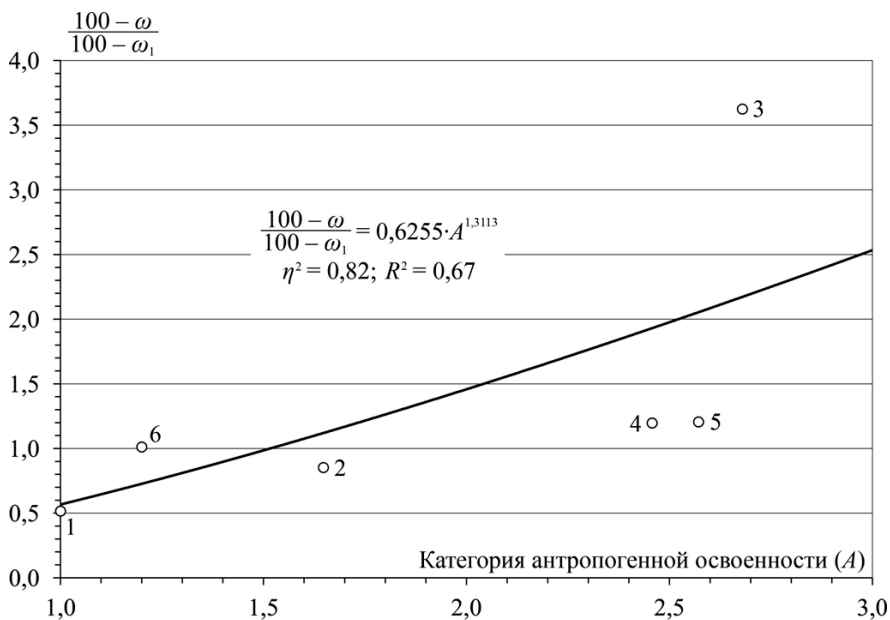


Рис. 3. Превышение фактической доли бассейновой составляющей стока взвешенных наносов рек $(100 - \omega)$ той же доли в бассейнах 1 категории освоенности $(100 - \omega_1)$ по природным зонам равнин Северной Евразии

*1 – тундра и лесотундра; 2 – тайга; 3 – широколиственный лес;
4 – лесостепь; 5 – степь; 6 – полупустыня умеренного пояса*

шее преувеличение фактической доли бассейновой составляющей $(100 - \omega)$ над долей бассейновой составляющей неосвоенных и слабоосвоенных бассейнов $(100 - \omega_1)$.

Осреднение, проведенное по зональным значениям отношения $\frac{100 - \omega}{100 - \omega_1}$, показано на рисунке 3. Рисунок показывает, что при полном прекращении сельскохозяйственной деятельности на поверхности речных бассейнов доля бассейновой составляющей стока взвешенных наносов способна уменьшиться почти вдвое по сравнению с ее долей в бассейнах 1 категории. Такое уменьшение легко объяснимо с тех позиций, что бассейны 1 категории, строго говоря, не являются природными, их поверхность до некоторой степени также изменена человеком. В нынешнюю эпоху (при средней категории освоенности земной поверхности, равной 2,1) увеличение доли бассейновой составляющей в стоке взвешенных наносов равнинных рек составляет 1,5 – 1,6 по сравнению с той же долей в бассейнах 1 категории. Наконец, если вся суша Земли окажется распаханной, т.е. будет переведена в 3 категорию освоенности, это вызовет увеличение доли бассейновой составляющей более чем в 2,5 раза по сравнению с бассейнами 1 категории.

Описываемая зависимость, связывающая категорию освоенности речных бассейнов равнин с отношением долей бассейновой составляющей стока наносов отличается высокой теснотой (коэффициент криволинейной корреляции $\eta^2 = 0,82$). И хотя полученные выводы обнаруживают некоторое расхождение с полученными ранее оценками [Дедков, Мозжерин, 2000; Мозжерин, Мозжерин, 2011 и др.], все же в целом их можно признать сопоставимыми с ними.

Литература

1. Дедков А.П., Гусаров А.В., Мозжерин В.В. Две системы эрозии в речных бассейнах равнин Земли и их взаимная трансформация (часть I) // Геоморфология, 2008, № 4. – С. 3 – 17.
2. Дедков А.П., Мозжерин В.И. Эрозия и сток наносов на Земле. Казань: Изд-во КГУ, 1984. – 264 с.
3. Дедков А.П., Мозжерин В.И. Глобальный сток наносов в океан: природная и антропогенная составляющие / Эрозионные и русловые процессы. Вып. 3. М., 2000. – С. 15 – 23.
4. Дедков А.П., Мозжерин В.И., Мартынова М.В. Сток наносов как функция площади бассейнов и стока воды / Тр. Акад. водохозяйств. наук. Русловедение и гидроэкология. Вып. 5. М., 2001. – С. 79 – 89.
5. Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. – 346 с.
6. Маккавеев Н.И., Чалов Р.С. Русловые процессы. М.: Изд-во МГУ, 1986. – 264 с.
7. Мозжерин В.И. Геоморфологический анализ твердого речного стока гумидных равнин умеренного пояса / Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. Казань: Изд-во КГУ, 1994. – 54 с.
8. Мозжерин В.И., Курбанова С.Г. Деятельность человека и эрозионно-русловые системы Среднего Поволжья. Казань: Арт Дизайн, 2004. – 128 с.
9. Мозжерин В.И., Мозжерин В.В. Мировой сток взвешенных наносов: его геоморфологическая и геоэкологическая интерпретация // Геоморфология, 2011, № 1. – С. 13 – 24.
10. Поляков Б.В. Гидрологический анализ и расчеты. Л.: Гидрометеоиздат, 1946. – 480 с.
11. Сток наносов, его изучение и географическое распределение. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. – 240 с.
12. Щеглова О.П. Генетический анализ и картографирование стока взвешенных наносов рек Средней Азии. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. – 128 с.