

УДК 551.435.1→556.535.6 (73)

© 2019 г. А.В. ГУСАРОВ*, Л.Ф. МАКСЮТОВА

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ СООТНОШЕНИЯ РУСЛОВОЙ И БАСЕЙНОВОЙ СОСТАВЛЯЮЩИХ ЭРОЗИИ И СТОКА ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ В РЕЧНЫХ БАСЕЙНАХ США

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия
*E-mail: avgusarov@mail.ru

Поступила в редакцию 09.10.2016

После доработки 18.07.2018

Принята к печати 09.10.2018

Взвешенные наносы водотоков, являющиеся одной из объективных и достаточно точных мер интенсивности эрозии в их бассейнах, в первом приближении можно разделить на русловую ($r_{\text{рус}}$, продукты вертикальных и горизонтальных русловых деформаций) и бассейновую ($r_{\text{бас}}$, продукты почвенной и овражной эрозии) составляющие. В работе предпринята попытка выделения данной структуры эрозии в речных бассейнах США на основе расчленения взвешенных наносов 224 рек (по материалам Геологической службы США о среднемесячных величинах стока воды и взвешенных наносов рек) по предложенному одним из авторов статьи методу, а также оценка ее факторной обусловленности.

Для всех проанализированных рек территории США средняя величина $r_{\text{рус}}$ составляет $7.9 \pm 1.1\%$: по равнинным рекам – $10.6 \pm 1.7\%$, по низкогорным – $5.7 \pm 1.5\%$, по среднегорным – $4.3 \pm 1.5\%$. На соотношение $r_{\text{рус}}/r_{\text{бас}}$ в стоке взвешенных наносов большое влияние оказывают, помимо геоморфологического фактора, также ландшафтно-климатические условия речных бассейнов. Так, на равнинах США наибольшая средняя доля $r_{\text{рус}}$ отмечается в лесных ландшафтных зонах (тайга, смешанные и широколиственные леса умеренного пояса, субтропический лес) – от 10 до 15%. Напротив, в аридных ландшафтах (полупустыни) эта величина не превышает 1%. Внутри этих общих тенденций наблюдаются достаточно сильные вариации соотношений $r_{\text{рус}}/r_{\text{бас}}$ в связи с изменениями площадей речных бассейнов, агрикультурной деятельности человека и литологического состава руслоформирующих наносов и пойм. Отмечается обратная гиперболическая зависимость между фактическим стоком взвешенных наносов рек и долей в нем наносов руслового происхождения, которая особенно эффектно проявляется на равнинах и в низкогорьях США. Также показано, что состав горных пород, слагающих поверхность речных бассейнов, не играет принципиально значимой роли в изменчивости соотношения $r_{\text{рус}}/r_{\text{бас}}$ в данном масштабе исследования. Сопоставление оценок $r_{\text{рус}}/r_{\text{бас}}$ и их факторной обусловленности по рекам США с реками Северной Евразии позволяет выявить очень хорошую сходимость полученных результатов по двум регионам планеты и предположить универсальный характер установленных закономерностей (суммарно по 684 речным бассейнам) для всего умеренного (частично субтропического и тропического) пояса Северного полушария Земли.

Ключевые слова: река, русло, речной бассейн, структура эрозии, сток взвешенных наносов, ландшафтная зональность, США.

THE MAIN REGULARITIES OF THE RATIO BETWEEN RIVERBED AND BASIN COMPONENTS OF EROSION AND SUSPENDED SEDIMENT YIELD IN RIVER BASINS OF THE USA

A.V. GUSAROV*, L.F. MAKSYUTOVA

Kazan Federal University, Kazan, Russia

**E-mail: avgusarov@mail.ru*

Received 09.10.2016

Revised 18.07.2018

Accepted 09.10.2018

S u m m a r y

Suspended sediment yield is one of the objective and sufficiently accurate measures of erosion intensity in river basins. In first approximation, it can be divided into the riverbed component $r(rb)$, the products of vertical and horizontal riverbed deformations), and basin component $r(bas)$, the products of soil and gully erosion. An attempt was made to distinguish this erosion structure in the USA river basins based on the partition of suspended sediments of 224 rivers (based on the data from the US Geological Service on the average monthly water discharges and suspended sediment yields) according to the method proposed by one of the authors of the paper, as well as an assessment of its factor dependence.

The average $r(rb)$ value for the analyzed rivers of the USA is $7.9 \pm 1.1\%$: for lowland rivers – $10.6 \pm 1.7\%$, for low-mountain (including high uplands) rivers – $5.7 \pm 1.5\%$, for mid-mountain rivers – $4.3 \pm 1.5\%$. The geomorphic factor, landscape and climatic conditions within the river basins have a major impact on the suspended sediments flux ratio $r(rb)/r(bas)$. Thus, in the USA plains, the largest average $r(rb)$ portion is in the forest landscapes (taiga, mixed and broadleaf forests of the temperate zone, subtropical forests) – 10–15%. On the contrary, in the arid landscapes (semi-deserts) this value does not exceed 1%. Within these general trends, there are quite strong variations in the $r(rb)/r(bas)$ ratios due to the changes in river basin areas, agricultural activities and lithologic composition of riverbed and floodplain sediments. There is an inverse hyperbolic relationship between the actual suspended sediment yield of the rivers and the riverbed sediment portion ($r(rb)$), which is most manifested in the plains and low-mountains of the USA. It is also shown that a composition of the river basin parent (surficial) rocks does not play a significant role in the variability of the $r(rb)/r(bas)$ at this scale of the study. A comparison of the $r(rb)/r(bas)$ -estimates and their factor dependence on the US rivers with the rivers of Northern Eurasia (the territory of the former Soviet Union) makes it possible to reveal good convergence of the results obtained in these parts of the Earth, and to suggest the universal nature of the revealed regularities (in total for 684 river basins) for the whole temperate (partly for subtropical and tropical) zone of the Northern hemisphere of our planet.

Keywords: river, riverbed, river basin, erosion structure, suspended sediment yield, landscape zonation, United States of America (USA).

Введение

Взвешенные наносы – мелкие, преимущественно минеральные частицы – продукты полигенетической (главным образом водно-эрозионной) механической денудации, переносимые водным потоком во взвешенном состоянии. Объем их стока напрямую зависит от интенсивности процессов эрозии (шире – механической денудации) в бассейне водотока. В этой связи, взвешенные наносы выступают в качестве объективного и достаточно точного показателя общей интенсивности эрозии в бассейновых геосистемах. На долю взвешенных наносов обычно приходится у равнинных рек около 90–97% от общего стока наносов, и лишь в горных реках они сокращаются до 30–85% [1]. Для ряда рек восточного Урала, к примеру, грядово-песчаный перенос как форма транспортировки донных наносов достигает даже 90% общего стока наносов [2]. Более того, значительная часть продуктов эрозии междуречий аккумулируется на склонах долин рек, в их поймах и руслах, формируя новые генерации делювия, пролювия и аллювия (т.н. продукты местной эрозионной денудации речных бассейнов), и доля этих аккумулированных продуктов неодинакова, что определяется разнообразием геологических, геоморфологических и ландшафтно-климатических условий в бассейнах. Те же продукты водно-

механической денудации, что выносятся реками за пределы их бассейнов, т.н. продукты транзитной эрозии [3], отвечают, наряду с другими агентами механической денудации, а также химической денудации при ионном стоке рек, за изменение (уменьшение) средних высот бассейна. В комбинации с тектоническими движениями они определяют общую направленность развития (восходящее, нисходящее или равномерное) бассейнового рельефа. Соответственно, оценки общей эрозионной (шире – механической) денудационной активности и направленности развития рельефа в бассейнах рек только по стоку взвешенных наносов могут допускать некоторые, порой серьезные, погрешности.

Эрозия и связанный с ней сток наносов рек – одна из актуальных геоэкологических проблем в США. С начала европейской колонизации скорости эрозии на равнинах страны возросли более чем в 10 раз, и потери плодородного почвенного слоя в ряде штатов за минувшие 200–250 лет составили от 10 до 25 см [4]. Это заметнее всего проявилось в Аппалачах и в их восточном предгорье (Пидмонт), где, к примеру, несмотря на сравнительно умеренные модули стока взвешенных наносов рек (до 50–100 т/км²×год), они далеко не полно отражают общие темпы эрозионных процессов (и объемы смыва) на местных водосборах. Так, исследования в четырех речных бассейнах (с площадью от 1119 до 4217 км² и со средним многолетним модулем стока взвешенных наносов 63 т/км²×год) в шт. Северная Каролина показали, что лишь только 7–16% продуктов склонового смыва выносятся за пределы бассейнов, 71–81% – перераспределяется на склонах, а остальные – аккумулируются в днищах речных долин [5]. В 1980-е гг. эрозия почв, причинившая к этому периоду значительный ущерб хозяйству страны, существенно изменила отношение к необходимости противоэрозионных мероприятий со стороны федеральных властей страны. В 1985 г. Конгресс США принял новую природоохранную программу “консервации” земель, и в конце 1980-х гг. Министерство сельского хозяйства США рапортовало, что с 1986 по 1987 гг. потеря почвенной массы от эрозии на пахотных землях страны, по причине перевода до 40 млн. акров (ок. 11% всей пашни США) под пастбища и леса, уменьшилась на 460 млн. тонн. Насколько нам известно, это крупнейшее сокращение, которое когда-либо имелось в мировой противоэрозионной практике в столь короткие сроки: сокращение потерь почвенной массы от эрозии в среднем по территории США составило 49 т/км² за два года. Если в конце 1960-х гг. потери гумусового слоя на полях страны составляли около 3 млрд. тонн [6], то уже к 1982 г. – лишь 2.6 млрд. тонн [7]. И далее, в период с 1982 по 1997 гг. темпы плоскостной и ручейковой эрозии на обрабатываемых землях по модельным (USLE) расчетам сократились на 30% [8]. При этом огромная масса продуктов водно-механической денудации аккумулировалась в малых и средних прудах и водохранилищах страны, которых в стране несколько миллионов. Только в 43 тыс. водохранилищах, внесенных в список National Inventory of Dams, средняя скорость седиментации этих продуктов составляла 1.67×10⁹ м³/год [9]. Тем не менее, современная картина эрозионной активности в стране все еще заметно отличается от той, что была до европейской колонизации континента, и по пространственному распределению речного стока взвешенных наносов в США выделяют (по [3, 10]) следующие основные регионы:

1) восточная часть страны (зона тайги и широколиственных лесов) с модулями стока наносов равнинных рек от 50 до 100 т/км²×год, в Аппалачах – до 100–150 т/км²×год и более;

2) западная (горная) часть страны с модулями стока наносов от 100–150 т/км²×год в предгорной части до 1000 (Береговые хребты Кордильер) – 2000 (горы юга штата Аляска) т/км²×год;

3) юго-восток США с ландшафтами сезонно-влажных субтропических лесов с модулями стока наносов равнинных рек 100–150 т/км²×год; на землях, освоенных под хлопок, – до 500 т/км²×год и более;

4) семиаридный и аридный юго-запад США (включая пустыни Большого бассейна) с модулями стока наносов до 20–100 т/км²×год; на более увлажненном и хорошо хозяйственно освоенном побережье Тихого океана (Калифорния) модули наносов достигают иногда 3000–4000 т/км²×год.

Несмотря на противоэрозионные успехи в США в последние десятилетия, эрозионная проблема и связанный с ней сток взвешенных наносов рек продолжают оставаться актуальными, хотя интерес к ним со стороны американского научного сообщества несколько убавился. Это отражается в сокращении числа современных научных публикаций (хотя в абсолютном исчислении они весьма многочисленны), к примеру, по изучению стока взвешенных наносов, их источников и эколого-географической интерпретации. Практически все они, за редким исключением, имеют территориально небольшой охват исследования [11–24 и многие др.], и анализу этих публикаций можно посвятить не одну отдельную интересную обзорную статью.

Наряду с определением суммарной интенсивности эрозии (транзитной эрозионной денудации) в речных бассейнах, взвешенные наносы могут быть использованы и для расчета ее общей структуры – выделения русловой (продукты горизонтальных (плановых) и вертикальных (глубинных) русловых деформаций) и бассейновой (продукты почвенно-овражной эрозии) составляющих. К сожалению, в потоке статей по эрозионной проблематике США мы встретили крайне мало работ, так или иначе посвященных вычленению русловой и бассейновой составляющих стока взвешенных наносов и эрозионной активности в бассейнах рек разного порядка, особенно в масштабе всей территории США. Одной из таких работ является отчет А. Дж. Одгаарда [25] из Института гидравлических исследований (шт. Айова). Основываясь на анализе аэрофотоснимков, карт и гидрологических данных, автор резюмирует, что из всей массы взвешенных наносов, покидающих с речными водами территорию шт. Айова, около 45% обязаны своему происхождению именно русловой эрозии в речных бассейнах. В работе [26] на примере небольшого участка русла малого (ок. 60 км²) урбанизированного водосбора Валлей Крик (Valley Creek), расположенного на территории Национального исторического парка в шт. Пенсильвания, вклад (по наблюдениям с 2003 по 2006 гг.) русловой эрозии в формирование стока взвешенных наносов составил 43%, что связано, на наш взгляд, скорее всего, с существенным ослаблением процессов почвенно-овражной эрозии на урбанизированных площадях бассейна. В другой работе [27], с использованием подхода “Sediment source fingerprinting” (анализ химико-минералогического состава наносов в окружающей среде при определении источника их поступления), дана оценка относительного вклада различных потенциальных источников тонкозернистых наносов в малом (147 км²) водосборе Линганор Крик (Linganore Creek, шт. Мериленд) по наблюдениям с 2008 по 2010 гг. Показано, что на долю речной береговой эрозии в этот период приходилось около 53% годового стока тонкозернистых взвешенных наносов, около 44% составили наносы с сельскохозяйственных полей и 3% – с земель под лесом. Даже такой немногочисленный ряд работ уже показывает существенный (почти половина) вклад русловой эрозии в формирование стока взвешенных наносов малых водосборов региона. Однако полученные нами результаты, основанные на использовании гидрологического метода, отводят русловой эрозии в более крупных водосборах в целом по стране более скромную роль в формировании стока взвешенных наносов рек, хотя от бассейна к бассейну ее оценки могут значительно варьировать. Выявление основных и общих закономерностей (факторная обусловленность) соотношения русловой и бассейновой составляющих эрозии (здесь и далее – транзитной эрозии (см. выше)) по стоку взвешенных наносов рек Северной Америки на примере территории США посвящена настоящая работа.

Материал исследования

Материал исследования – результаты многолетних наблюдений (в основном с 1950-х гг. и по 2014 г.) на сети гидрологических станций Геологической службы США [28] за расходами воды (Q) и взвешенных наносов (R), представленные в виде их среднесесячных величин. Процедуре первоначального отбора было подвергнуто 1776 станций сети. Основные критерии отбора – продолжительность парных наблюдений Q – R (не менее 10 лет [29]) и наличие информации по факторам формирования стока наносов (литология пород, высота и лесистость бассейнов, агрикультурная освоенность их ландшафтов). В итоге такого отбора использованный в работе материал охватил лишь 224 (12.6% всей совокупности) речных бассейна, т.е. с высокой вероятностью полученные по этой выборке результаты могут быть, в целом, экстраполированы на всю остальную сеть гидрологических станций страны. Расположение анализируемых станций, охватившее основную территорию США (без шт. Аляска), о-в Пуэрто-Рико и Гавайские о-ва, показано на рис. 1.

Отобранные речные бассейны были сгруппированы по трем площадным категориям: 1) бассейны малых рек – площадью менее 2000 км², 2) средних рек – от 2000 до 25000 км², 3) крупных рек – более 25000 км²; они также были разделены на 3 высотные группы – равнинные (со средними абс. высотами от 0 до 500 м), низкогорные (500–2000 м) и среднегорные (2000–3500 м) (табл. 1). Средняя продолжительность периода Q – R наблюдений на гидрологических станциях незначительно отличается по высотным группам. Дополнительно все проанализированные речные бассейны были разделены по их широтно-зональной и высотнопоясной ландшафтной принадлежности (рис. 2). Разделение бассейнов было проведено (по схеме [3]) также по степени антропогенной (сельскохозяйственной) освоенности их природных ландшафтов на три категории: I (1 балл) – малоизмененные бассейны (в лесных зонах залесенность составляла более 70%, в преимущественно степных зонах распаханность – менее 30%), II (2 балла) – со средней степенью изменения ландшафтов (залесенность для бассейнов лесных зон и распаханность для степных – от 30 до 70%), III (3 балла) – сильно измененные человеком бассейны (распаханность – более 70%) (табл. 1).

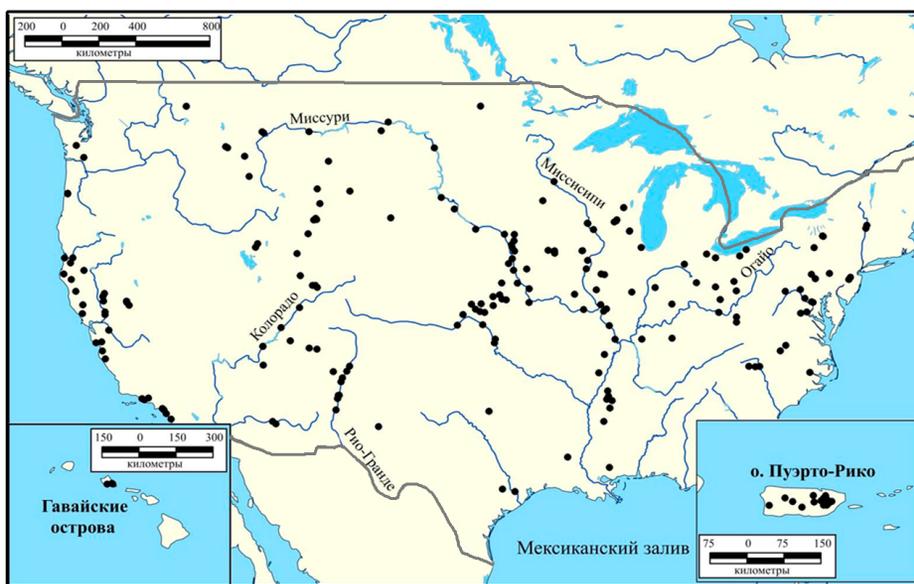


Рис. 1. Карта расположения анализируемых гидрологических станций (постов) сети Геологической службы США на реках страны (без шт. Аляска; с о-вом Пуэрто-Рико)

Некоторые характеристики анализируемых речных бассейнов США

Показатели	Речные бассейны		
	равнинные	низкогорные	среднегорные
N , ед.	109 (48.7%)	84 (37.5%)	31 (13.8%)
F , км ²	125195±68862*	16714±11284	45096±22148
T , кол-во лет	18.7±1.8	18.4±2.1	24.5±4.2
A (I/II/III, %)	2.5 (7.9/49.5/42.6)	1.5 (50.6/47.0/2.4)	1.0 (100/0/0)
U/C	9.6/48.8	8.2/13.5	1.8/2.5
$M(Q)$, л/с×км ²	8.7±1.3	15.1±3.6	4.9±3.4
$M(R)$, т/км ² ×год	254±106	579±153	163±85

N – количество речных бассейнов, F – средняя площадь бассейнов, T – средняя продолжительность наблюдений за Q и R , A – средний балл хозяйственной освоенности ландшафтов бассейнов (I/II/III – распределения бассейнов по категориям освоенности), U/C – средняя площадь под населенными пунктами в бассейне (%) / обрабатываемые земли в бассейне (%), $M(Q)/M(R)$ – средний многолетний модуль стока воды (взвешенных наносов) рек.

* доверительные границы всех средних характеристик установлены с вероятностью 0.95 (5%-й уровень значимости).

Метод исследования

Наиболее полно содержание метода, включая его недостатки, ранее изложено в работе [30] и апробировано на реках Северной Евразии [31]. Вкратце напомним его суть. На первом этапе производится построение графиков связи среднемесячных величин стока воды (Q_i) и взвешенных наносов (R_i) за весь период наблюдений (свыше 10 лет) для каждой анализируемой реки, которая описывается уравнением степенного вида:

$$R_i = A_{sp} I Q_i^m, \quad (1)$$

где R_i – теоретический (регрессионный) среднемесячный сток взвешенных наносов за календарный i -месяц с водностью Q_i , A_{sp} – эмпирический комплексный эрозионный коэффициент, зависящий от неравномерности стока воды в течение года, характера пород, слагающих русло и водосбор, количества и крупности наносов, поставляемых при размыве самого русла выше по течению, притоками и с водосбора, I – уклон речного потока выше гидрологической станции, m – эмпирический степенной показатель связи Q_i и R_i . Величины A_{sp} и I могут существенно варьировать от реки к реке в зависимости от геолого-геоморфологического строения их бассейнов и русел, а также физико-географических условий на водосборе [2]. Уравнение (1), на наш взгляд, наиболее точно отражает зависимость R от Q и их совместную изменчивость. На следующем этапе из полученного графического поля точек связи Q_i и R_i выбирались величины стока воды, соответствующие меженным расходам в разные по меженной водности годы. В дальнейшем, из графического “меженного” поля точек Q_i-R_i , выбираются лишь те, что характеризуются наименьшими величинами R_i при данных среднемесячных расходах воды Q_i (как правило, 2–3 точки). Полученное по этим точкам уравнение связи Q_i-R_i , условно соответствующее модели “чистой” меженной русловой эрозии в системе “сток воды реки → русловая эрозия → сток взвешенных наносов руслового происхождения”, является основой для разделения годовых величин стока взвешенных наносов на бассейновую и русловую составляющие. Это уравнение имеет вид:

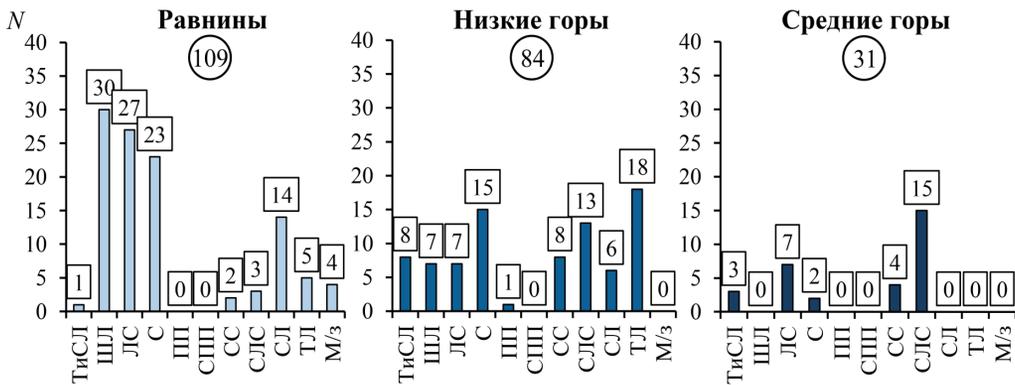


Рис. 2. Распределение бассейнов анализируемых рек США (N, ед.) по природным (ландшафтным) зонам на равнинах и высотным поясам в горах

Умеренный пояс: ТиСЛ – тайга и смешанный лес, ШЛ – широколиственный лес, ЛС – лесостепь, С – степь, ПП – полупустыня; субтропический пояс: СПП – субтропическая полупустыня, СС – субтропическая степь, СЛС – субтропическая лесостепь, СЛ – субтропический лес; тропический пояс: ТЛ – тропический лес; М/з – межзональные бассейны; в кружке – общее количество бассейнов в высотной группе

$$r_i = A_{sp} I Q_i^n, \quad (2)$$

где r_i – теоретический (регрессионный) среднемесячный сток взвешенных наносов руслового происхождения, n – эмпирический степенной показатель связи меженных Q_i и R_i для данного уравнения (остальные коэффициенты обозначены в уравнении (1)). Используя данное уравнение, однако, необходимо понимать, что большое влияние на размывающую способность рек оказывают, помимо характеристик водности, еще и характер абразии и характер растительного покрова берегов и береговой отмели рек, морфолого-литологические особенности строения поймы и т.д. Это заметно влияет на вариабельность величин r_i не только в пространстве, но и во времени (особенно в процессе русловых деформаций в многоводные фазы). С другой стороны, использование наименьших среднемесячных (к сожалению, не среднесуточных) величин стока взвешенных наносов, включающих в себя не только его реальные меженные, но и прерывающие их редкие (не вычитаемые) паводочные составляющие в календарный месяц, дает сравнительно грубую оценку “чистой” русловой эрозии, которая, в этой связи, вполне может быть даже несколько завышенной. Тем не менее, несмотря на вышеперечисленные и некоторые другие ограничения метода, в крупнорегиональных и, тем более, глобальных исследованиях такой подход, учитывая доступность исходной информации и ее генерализацию, можно считать, на наш взгляд, вполне удовлетворительным.

Полученные теоретические среднемесячные величины русловых взвешенных наносов (r_i) усредняются для каждого года и, далее, для всего периода наблюдений для анализируемой реки (r_{cp}), и затем соотносятся со средней годовой и среднемноголетней (R_{cp}) величинами фактического речного стока взвешенных наносов. В результате полученная величина $r_{pvc} = (r_{cp}/R_{cp}) \times 100\%$ представляет собой долю наносов руслового происхождения в среднем многолетнем фактическом стоке взвешенных наносов реки. Доля бассейновой составляющей стока взвешенных наносов реки будет, соответственно, равна $r_{bac} = 100\% - r_{pvc}$.

Результаты и их обсуждение

1. Для всех проанализированных рек территории США средняя величина русловой составляющей (r_{pvc}) не превышает 10–11%: по равнинным рекам – $10.6 \pm 1.7\%$, по низкогорным – $5.7 \pm 1.5\%$, по среднегорным – $4.3 \pm 1.5\%$. Средний для рек США показатель $r_{\text{pvc}} = 7.9 \pm 1.1\%$.

Одним из объяснений сравнительно небольшого, в целом, участия русловых наносов в формировании общего стока взвешенных наносов рек США можно считать тот факт, что основное количество включенных в анализ гидрологических станций страны располагается на реках, бассейны которых (прежде всего равнинные) в средней и сильной степени хозяйственно освоены (Приатлантическая низменность, Центральные равнины, Калифорния – см. рис. 1). Здесь продукты почвенно-овражной эрозии в значительном количестве поступают с обрабатываемых полей и пастбищ в речную сеть, определяя высокие величины r_{bac} (в среднем выше 90%). Однако указанное обстоятельство вовсе не исключает высокую вариабельность $r_{\text{pvc}}/r_{\text{bac}}$ по территории США, особенно, опять-таки, среди равнинных речных бассейнов. Так, для последних доля бассейнов, где в реках отмечается $r_{\text{pvc}} > 10\%$ (зафиксированный в этой высотной группе максимум $r_{\text{pvc}} = 37.5\%$), составляет 40% (или 44 бассейна из 109), для низких гор (зафиксированный максимум $r_{\text{pvc}} = 41.6\%$) – 13% (или 11 бассейнов из 84), а для среднегорий (зафиксированный максимум $r_{\text{pvc}} = 10.6\%$) – 3.2% (всего один бассейн из 31). В конкретных примерах максимальные показатели r_{pvc} выглядят следующим образом: Шейенн Ривер/Хот Спрингс (Cheyenne River near Hot Springs, шт. Южная Дакота, низкогорье, степь, $F = 22582 \text{ км}^2$, $M(Q) = 0.18 \text{ л/с} \times \text{км}^2$, $M(R) = 74.6 \text{ т/км}^2 \times \text{год}$, лесистость – 7.2%, агрикультурная освоенность – 0.36%, урбанизированные территории – 0.38%) – $r_{\text{pvc}} = 41.6\%$; Хотофия Крик/Бэйтсвилл (Hotophia Creek near Batesville, шт. Миссисипи, равнина, зона субтропических лесов, $F = 90.9 \text{ км}^2$, $M(Q) = 17.1 \text{ л/с} \times \text{км}^2$, $M(R) = 774.7 \text{ т/км}^2 \times \text{год}$, лесистость – 35%, агрикультурная освоенность – 31.6%, урбанизированные территории – 7.6%) – $r_{\text{pvc}} = 37.5\%$; Южный Ядкин/Моксвилл (South Yadkin River near Mocksville, шт. Северная Каролина, низкогорье, зона субтропических лесов, $F = 792.5 \text{ км}^2$, $M(Q) = 13.2 \text{ л/с} \times \text{км}^2$, $M(R) = 89.8 \text{ т/км}^2 \times \text{год}$, лесистость – 48.8%, агрикультурная освоенность – 36.6%, урбанизированные территории – 7.3%) – $r_{\text{pvc}} = 36.5\%$.

Относительно более сильной почвенно-овражной эрозии и высоким величинам бассейновой составляющей стока взвешенных наносов в горных реках благоприятствуют, при прочих равных условиях, наибольшие уклоны их поверхностей и большие модули стока воды, что обуславливает и высокие модули стока взвешенных наносов в природных условиях. Помимо этого, значительная масса обломочного материала пополняет реки благодаря также гравитационным процессам на крутых и высоких склонах речных долин. Особенно увеличивают здесь мутность воды оползневые массы, сходящие в русла многих горных рек во влажные годы. С другой стороны, для данной группы бассейнов характерны наибольшие уклоны русел и меньшее, в целом, соотношение между средними уклонами поверхности бассейнов и русел рек. Это повышает относительную роль русловой (главным образом глубинной) эрозии в формировании стока наносов в речных бассейнах данной высотной группы. Однако, с другой стороны, руслоформирующий аллювий этих рек является преимущественно валунно-галечным и/или галечно-валунным [2], который дает относительно размывающего потенциала реки, в целом, небольшую массу взвешенных наносов в процессе русловых деформаций. При таком составе взвешенные наносы практически не участвуют в сложении этого аллювия. Кроме того, галечно-валунные наносы горных рек в межень формируют отмостку из наиболее крупного материала, что

Дженерал Крик/Микс Бэй

$F = 19.3 \text{ км}^2$; $T = 12 \text{ лет}$

$M(Q) = 28.3 \text{ л/с} \times \text{км}^2$

$M(R) = 15.1 \text{ т/км}^2 \times \text{год}$

$C_v(Q) = 139\%$

$C_v(R) = 367\%$

Ворд Крик/Тахо Пайнс

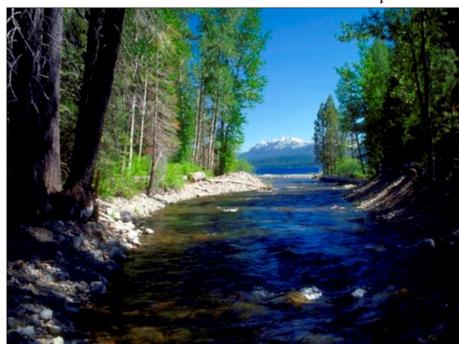
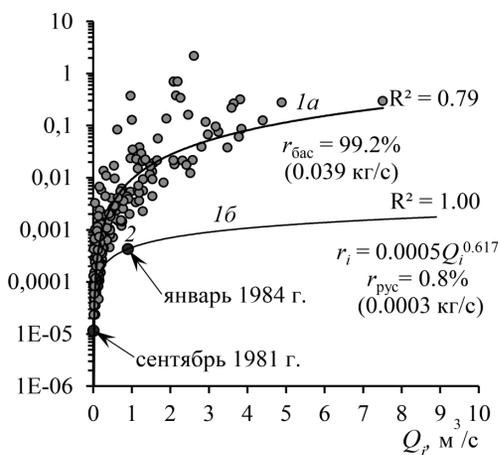
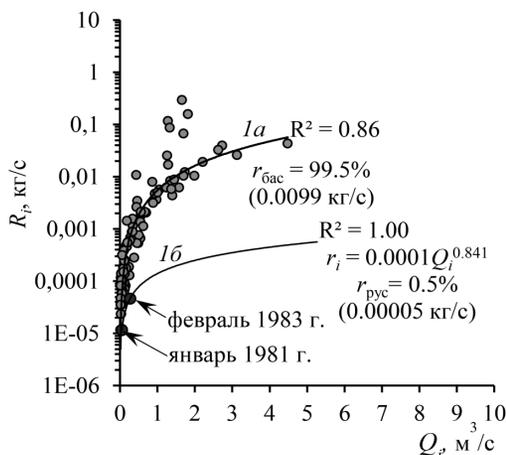
$F = 25.1 \text{ км}^2$; $T = 20 \text{ лет}$

$M(Q) = 31.3 \text{ л/с} \times \text{км}^2$

$M(R) = 53.3 \text{ т/км}^2 \times \text{год}$

$C_v(Q) = 140\%$

$C_v(R) = 426\%$



Валунно-галечные русла рек (ручьев) Дженерал Крик (слева) и Ворд Крик (справа)

Рис. 3. Русловая и бассейновая составляющие в стоке взвешенных наносов рек (ручьев) Дженерал Крик/Микс Бэй (General Creek/Meeks Bay, шт. Калифорния) и Ворд Крик / Тахо Пайнс (Ward Creek/Tahoe Pines, шт. Калифорния), США (здесь и далее используются фотографии из свободного электронного доступа)

Q и R – среднемесячные расходы воды и взвешенных наносов за период наблюдения; I – линии степенного тренда: a – уравнения (1), b – уравнения (2); 2 – парные среднемесячные величины Q_i – R_i , отобранные из всего массива данных для построения уравнения (2); R^2 – коэффициент аппроксимации линии тренда; $C_v(Q)$ ($C_v(R)$) – коэффициент внутригодовой вариации среднемесячных величин стока воды (взвешенных наносов) реки за период наблюдения.
Прочие усл. обозн. см. табл. 1.

обеспечивает стабильность русел в эту фазу водного режима. Однако в паводки, когда слагающие отмостку обломки приходят в движение, в поток вовлекается большое количество гравийно-песчаного материала, лежащего под отмошкой, и его мутность многократно возрастает [2]. Отметим, что отмостка формируется также у рек равнинного типа в горах (реки межгорных котловин и впадин) [32].

На рис. 3, на примере двух равновеликих и близких по водоносности малых рек (ручьев) Дженерал Крик (General Creek) и Ворд Крик (Ward Creek), протекающих в среднегорьях шт. Калифорния, видна крайне невысокая доля руслового стока

Грин Ривер/Грин Ривер

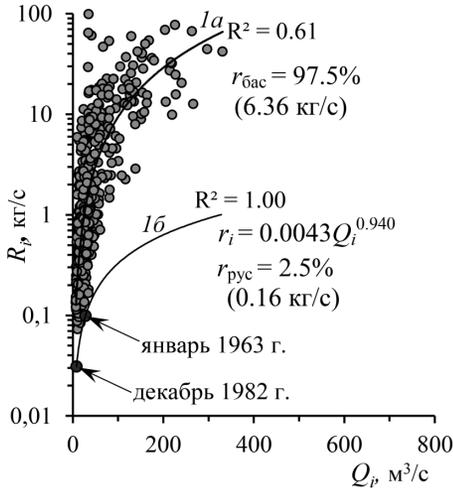
$F = 36259.8 \text{ км}^2$; $T = 39 \text{ лет}$

$M(Q) = 1.32 \text{ л/с} \times \text{км}^2$

$M(R) = 5.6 \text{ т/км}^2 \times \text{год}$

$C_v(Q) = 103\%$

$C_v(R) = 230\%$



Кутеный Ривер/Копланд

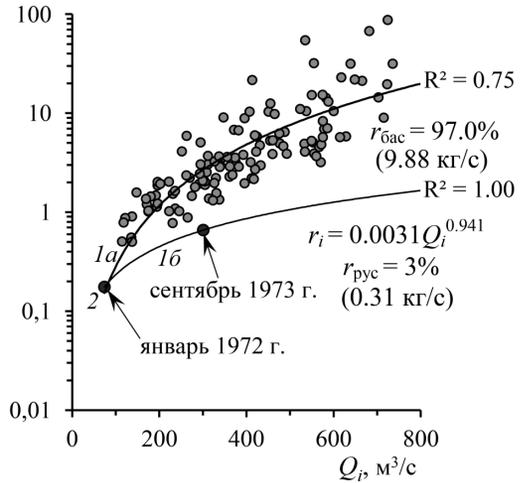
$F = 34705.8 \text{ км}^2$; $T = 12 \text{ лет}$

$M(Q) = 12.4 \text{ л/с} \times \text{км}^2$

$M(R) = 9.3 \text{ т/км}^2 \times \text{год}$

$C_v(Q) = 51\%$

$C_v(R) = 179\%$



Валуно-галечные русла рек Грин Ривер (слева) и Кутеный Ривер (справа)

Рис. 4. Русловая и бассейновая составляющие в стоке взвешенных наносов рек Грин Ривер/Грин Ривер (Green River/Green River, шт. Вайоминг) и Кутеный Ривер/Копланд (Kootenai River/Copeland, шт. Айдахо), США. Усл. обозн. см. рис. 3 и табл. 1.

взвешенных наносов (менее 1%), обусловленная весьма слабой эрозией в валуно-галечных руслах. Тем не менее, если судить по многолетним модулям стока взвешенных наносов этих рек, суммарная транзитная эрозия в бассейне Ворд Крик в 3.5 раза сильнее, чем в бассейне Джeneral Крик, притом, что оба бассейна характеризуются высокой лесистостью (соответственно 78.5% и 76.9%), а обрабатываемые земли в них почти отсутствуют. Их фактический сток наносов практически полностью обусловлен относительно сильной почвенно-овражной эрозией на небольших эрозионно-опасных участках бассейнов. Аналогичная небольшая доля русловых наносов сохраняется для русел не только малых, но и более крупных рек низкогорий (табл. 2) и среднегорий (рис. 4) страны. На рис. 4 обращают на себя внимание сравнительно близкие (различаются лишь в 1.7 раза)

модули стока взвешенных наносов двух равновеликих рек, водоносность которых отличается при этом в 9.4 раза. Основная причина здесь заключается, по-видимому, в том, что бассейн р. Грин Ривер (Green River) расположен в семиаридных климатических условиях с незначительной антропогенной нагрузкой на ландшафты (лесистость – около 9%, обрабатываемые земли – около 3%, территории под населенными пунктами – 0.7%), что обуславливает естественную бассейновую эрозию на большей части его площади. Бассейн р. Кутенай Ривер (Kootenai River) находится в гумидных условиях (лесистость – 78.4%) также со слабой антропогенной нагрузкой (обрабатываемые земли – около 1.2%, урбанизированные территории – 0.8%). В последнем случае естественная почвенно-овражная эрозия на небольших (около 20% площади бассейна) территориях оказывается в модульных величинах многократно выше, чем средний по бассейну модуль стока наносов. Этому способствуют и более высокие, чем у р. Грин Ривер, модули стока воды в бассейне. Несмотря на столь различные природно-антропогенные условия формирования бассейновых наносов, образование наносов руслового происхождения в валунно-галечных руслах обеих рек следует иной схеме: скорости размыва в р. Кутенай Ривер лишь в два раза превосходят таковые в р. Грин Ривер (судя по расходам русловых наносов), хотя, согласно соотношению водоносности рек (соответственно 47.9 и 430.4 м³/с), они должны быть существенно выше. Одной из причин этого является, скорее всего, вдвое большая внутригодовая неравномерность стока воды р. Грин Ривер, что связано с возрастанием руслоформирующих расходов реки в паводочные периоды года, которые уже более или менее сопоставимы (однопорядковые) с таковыми в р. Кутенай Ривер.

Реки равнин имеют иные геолого-геоморфологические условия формирования взвешенных наносов. Сравнительно высокая величина соотношения между средними уклонами поверхности бассейнов и русел рек здесь снижает, при прочих равных условиях, роль русловой (главным образом, глубинной) эрозии (и величины $r_{\text{рус}}$) в общей интенсивности эрозии в бассейнах. Однако сложение русел и пойм рек

Таблица 2

Русловая составляющая в стоке взвешенных наносов ($r_{\text{рус}}$) некоторых рек низкоргорий США

Река/пост/штат	F , км ²	$M(Q)$, л/с×км ²	$M(R)$, т/км ² ×год	U , %	L , %	C , %	$r_{\text{рус}}$, %
Потомак / Поинт-оф-Рокс / (Potomac River at Point of Rocks) / Мериленд	24996	11.1	48.4	8.3	62.9	27.5	8.4
Салинас Ривер / Спрекелс (Salinas River near Spreckels) / Калифорния	10764	0.9	178.3	25.0	0	73.4	0.3
Русская / Гернвилл (Russian near Guerneville) / Калифорния	3465	23	436	12.3	25.5	7.6	2.7
Кларк Форк / Дир Лодж (Clark Fork at Deer Lodge) / Монтана	2592	2.6	3.6	4.7	44.8	5.6	4.5
Файвмайл Крик / Ривертон (Fivemile Creek near Riverton) / Вайоминг	922	2.4	662.8	2.6	0.6	14.8	5.3
Мадди Крик / Вагн (Muddy Creek near Vaughn) / Монтана	663	6.3	340.7	3.2	0.02	65.2	4.4

L – лесистость бассейна. Прочие усл. обозн. см. табл. 1.

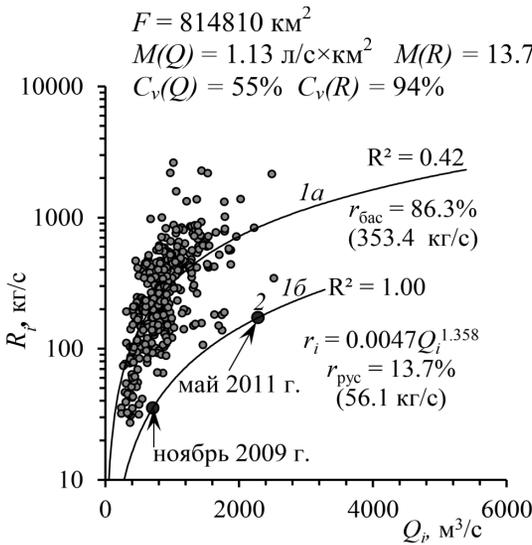


Рис. 5. Русловая и бассейновая составляющие в стоке взвешенных наносов р. Миссури у г. Сиукс (Missouri River at Sioux City, шт. Айова), США. Усл. обозн. см. рис. 3 и табл. 1

равнин (особенно низменных) преимущественно песчаным, песчано-илистым, илистым и илесто-органическим аллювием [32] – обстоятельство, которое, напротив, благоприятствует интенсивной русловой эрозии (главным образом, плановым деформациям) и повышает величину $r_{рус}$ (рис. 5). Увеличение средних показателей $r_{рус}$ равнинных рек в 1.9–2.5 раза по сравнению с горными реками подтверждает это. Реки с песчано-илистым аллювием характеризуются абсолютным преобладанием в отложениях взвешенной составляющей, оседающей при спаде паводков в межень [2].

2. Соотношение русловой и бассейновой составляющих стока взвешенных наносов рек ландшафтно и климатически обусловлено. Это наиболее выражено на равнинах (широтная зональность).

На равнинах США наибольшая средняя доля $r_{рус}$ отмечается в лесных зонах умеренного пояса (тайга, смешанные и широколиственные леса) – 10–15%, а также в речных бассейнах зоны субтропических лесов юга США – 14–15% (рис. 6). Это связано как с природными (хорошая защита почво-грунтов от плоскостной и линейной эрозии либо густым мохово-лишайниковым покровом, либо лиственным или хвойно-лиственным опадом, образующим лесную подстилку), так и антропогенными (относительно слабая, в целом, агрикультурная освоенность данных природных зон) причинами. В семигумидных и семиаридных ландшафтах (лестепь и степь) умеренного и субтропического поясов усредненная величина $r_{рус}$

Таблица 3

Средняя доля русловой составляющей ($r_{рус}$, %) в стоке взвешенных наносов разновеликих рек США по высотным группам (в скобках – количество речных бассейнов)

Высотные группы речных бассейнов	Речные бассейны, км ²		
	менее 2000	2000–25000	более 25000
Равнинные	9.9±2.3 (50)	10.8±3.5 (32)	12.3±3.4 (27)
Низкогорные	3.9±1.8 (44)	8.7±3.3 (28)	5.6±1.8 (12)
Среднегорные	3.3±3.9 (9)	1.9±2.7 (5)	4.7±1.5 (17)
США в целом	6.7±1.9 (103)	9.3±2.3 (65)	8.6±2.1 (56)

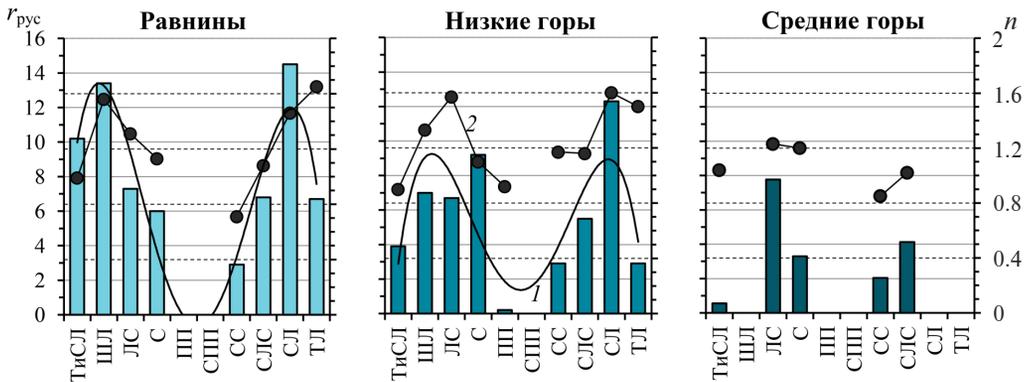


Рис. 6. Распределение средней доли русловой составляющей в стоке взвешенных наносов ($r_{рус}$ (%), столбчатая диаграмма) и степенного показателя n уравнения (2) рек США по природным (ландшафтным) зонам на равнинах и высотным поясам в горах (см. рис. 2)

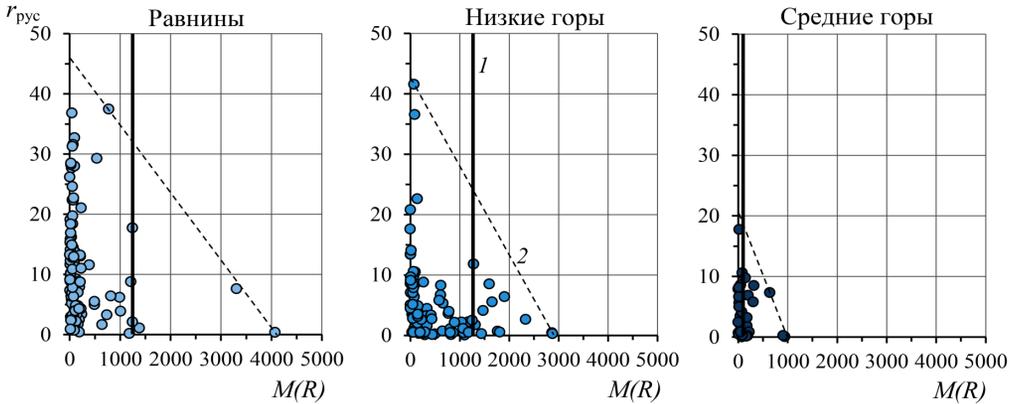
1 – полиномиальный тренд четвертой степени распределения $r_{рус}$, 2 – степенной показатель n .
Усл. обозн. см. рис. 2

изменяется от 3 до 7%, снижаясь в зонах полупустынь до менее чем 1%. Столь низкие величины $r_{рус}$ в полупустынях, помимо естественной обусловленности (слабая противоэрозионная роль разреженного травяного растительного покрова), связаны с относительно хорошей их хозяйственной (прежде всего пастбища) освоенностью, особенно в субтропическом поясе США. В речных бассейнах под тропическими лесами (о-в Пуэрто-Рико, Гавайские о-ва) $r_{рус}$ составляет около 6–7% при большой вариабельности оценок в связи с различным характером хозяйственного преобразования здесь природных ландшафтов. Для низкогорий США характерна, в целом, схожая тенденция распределения $r_{рус}$, но в умеренном климатическом поясе с относительным максимумом в степной зоне.

3. В целом наблюдается слабовыраженная тенденция увеличения доли русловой составляющей $r_{рус}$ от малых бассейнов к крупным (табл. 3, рис. 5).

4. Отмечается обратная гиперболическая зависимость между фактическим стоком взвешенных наносов рек и долей русловых наносов в нем, которая особенно эффектно проявляется на равнинах и в низкогорьях США (рис. 7). Так, здесь при $M(R)$ преимущественно менее $1250 \text{ т/км}^2 \times \text{год}$ доля русловых взвешенных наносов может варьировать в очень большом диапазоне – от долей процента до 42% и потенциально более, в зависимости от комбинации природных и антропогенных факторов. Выше $1250 \text{ т/км}^2 \times \text{год}$ $r_{рус}$ уже не превосходит 10% от общей массы взвешенных наносов. Следовательно, увеличение последней (по природным или антропогенным причинам) происходит главным образом за счет увеличения в реке продуктов бассейновой механической (преимущественно водно-механической) денудации. Эта закономерность четко выражена у равнинных рек, несколько хуже – в горах, одной из причин чему является лучшая и более разнообразная агрикультурная освоенность именно равнинных (в меньшей степени низкогорных) бассейновых природных ландшафтов. Свои коррективы в эту общую закономерность вносит целый ряд иных факторов, одним из которых является размер реки (площадь ее бассейна). Агрикультурная деятельность (сведение лесов, распашка, выпас и пр.) в речных бассейнах делает эту зависимость еще более выраженной. К сожалению, на данном этапе исследования, в силу недостаточной представительности речных бассейнов разной категории освоенности в их различных высотных и площадных группах, а также ландшафтно-климатических зонах и поясах, мы не можем надежно количественно охарактеризовать влияние разнообразной хозяйственной деятельности человека на трансформацию структуры

По высотным группам всех речных бассейнов



По площадным группам бассейнов равнинных рек

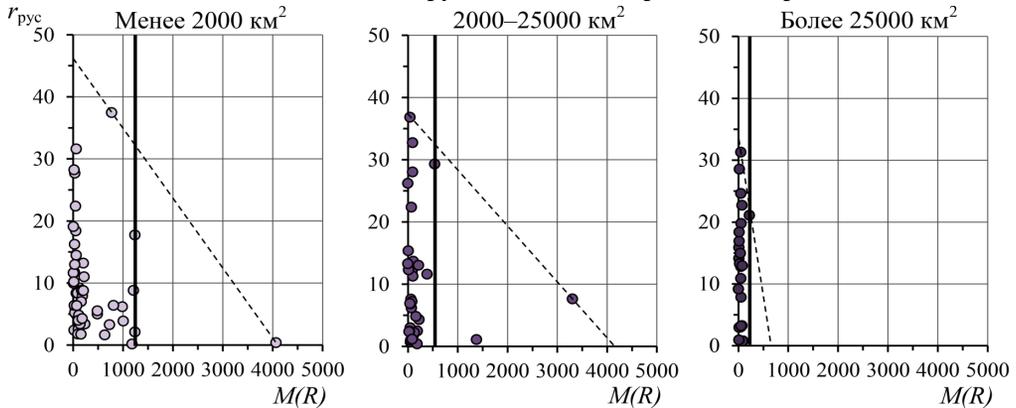


Рис. 7. Связь между модульными величинами общего стока взвешенных наносов ($M(R)$, $\text{т/км}^2 \times \text{год}$) и долей в нем наносов руслового происхождения ($r_{\text{рус}}$, %) рек США
1 – критическая величина $M(R)$, более которой $r_{\text{рус}}$ не превышает 10%, 2 – условная линейная граница максимально допустимых величин $r_{\text{рус}}$ при соответствующих значениях $M(R)$

эрозии и стока наносов в речных бассейнах США. В тоже время, отдельные примеры могут быть наглядными. Так, установленные сравнительно высокие величины $r_{\text{рус}}$ ряда равнинных рек востока и центра США могут иметь следующее объяснение, связанное именно с антропогенным фактором. В начале XIX в. интенсивные и, порой, катастрофические [33] эрозионные процессы на междуречьях региона (в частности, на западных предгорных равнинах Аппалачей) охватили большие площади в связи с возделыванием хлопчатника в сочетании с наибольшей для США интенсивностью и повторяемостью здесь ливневых осадков [34]. Аккумуляция продуктов бассейновой эрозии вызвала сильное заиление днщ речных долин вплоть до рек 3–5 порядков [35], что в ряде штатов явилось причиной участвовавших наводнений. В этой связи, начиная с 1930-х гг. стали проводиться работы по очистке русел рек от наносов с одновременным их спрямлением, что обусловило последующую естественную активизацию как глубинных, так и плановых деформаций самих русел, а также заиление днщ долин более высоких порядков, расположенных ниже по течению. К примеру, об одной из таких малых рек – Хотофия Крик (Hotohia Creek, шт. Миссисипи, $r_{\text{рус}} = 37.5\%$), упомянутой нами ранее, писали американские коллеги [36]. Продолжение этих процессов, судя

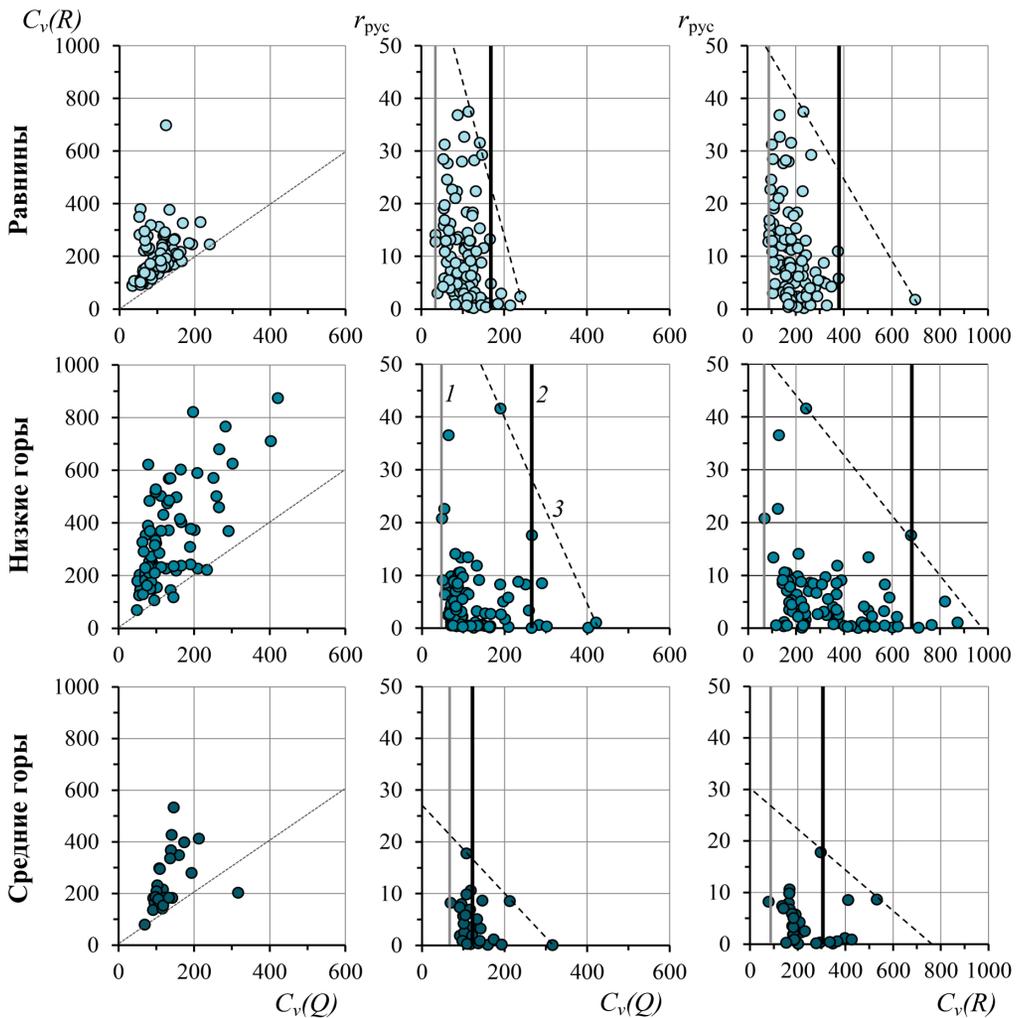


Рис. 8. Связь между коэффициентами внутригодовой вариации среднеемесячных величин речного стока воды ($C_v(Q)$, %), стока взвешенных наносов ($C_v(R)$, %) и долей русловых взвешенных наносов ($r_{\text{рус}}$, %) по высотным группам анализируемых речных бассейнов США

1 – критические величины коэффициентов $C_v(Q)$ и $C_v(R)$, ниже которых взвешенный материал руслового происхождения не отмечается в речных водах, 2 – критические величины $C_v(Q)$ и $C_v(R)$, выше которых величины $r_{\text{рус}}$ не превышают 10%, 3 – условная линейная граница максимально допустимых величин $r_{\text{рус}}$ при данных величинах $C_v(Q)$ и $C_v(R)$

по величинам $r_{\text{рус}}$ ряда рек, но уже в более ослабленной форме, мы видим, возможно, и в последние десятилетия.

5. Внутригодовая неравномерность стока воды как индикатор ландшафтно-климатических условий в речном бассейне – еще один важный фактор пространственной дифференциации соотношения русловой и бассейновой составляющих эрозии и стока взвешенных наносов в речных бассейнах. В целом по всем трем высотным группам бассейнов коэффициенты внутригодовой вариации стока воды не превосходят 200% (в низкогорном поясе – и до 400%), однако наибольший разброс оценок $r_{\text{рус}}$ отмечается в равнинной группе, что определено, прежде всего, разнообразием здесь природно-антропогенных ландшафтов (рис. 8).

Анализ рис. 8 также позволяет выявить следующие особенности.

А. При величинах внутригодовой неравномерности среднемесячного стока воды ($C_v(Q)$) как равнинных (до 35%), так и низко- (до 35%) и среднегорных (до 65–70%) анализируемых рек не отмечается присутствие взвешенных наносов руслового происхождения в общем (фактическом) их стоке (условно “мертвая зона” формирования русловых взвешенных наносов). Если и существуют в природе реки с такой невысокой внутригодовой неравномерностью водного стока, то живая сила их потока (главным образом в периоды паводков (половодий)) будет, скорее всего, явно недостаточной для заметных русловых деформаций, приводящих, в том числе, и к формированию взвешенных наносов руслового генезиса ($r_{\text{рус}} \rightarrow 0\%$). Имеющийся в водотоке взвешенный материал – почти нацело продукты бассейновой механической денудации ($r_{\text{бас}} \rightarrow 100\%$).

Б. В направлении от равнин к горам изменяется диапазон разброса показателей внутригодовой неравномерности как стока воды ($C_v(Q)$), так и взвешенных наносов ($C_v(R)$) (от т.н. “мертвой зоны” формирования русловых взвешенных наносов до критических величин $C_v(Q)$ и $C_v(R)$, выше которых $r_{\text{рус}}$ не превышает 10%), в котором доля наносов руслового происхождения меняется существенно. Этот диапазон достигает максимума в низкогорьях, и минимума – в среднегорьях.

6. По рекам США не выявлена значимая роль литологического фактора (состав пород, слагающих поверхность речных бассейнов) в формировании русло-бассейновой структуры стока взвешенных наносов, т.к. по всем литологическим комплексам пород (от эффузивных и магматических пород до лёссов и лёссовидных сугликов) отмечаются высокие величины (85–98%) бассейновой составляющей в речном стоке наносов. Вероятные причины этого мы объяснили ранее [31].

7. Проведенный нами по аналогичной схеме анализ соотношения $r_{\text{рус}}/r_{\text{бас}}$ для рек Северной Евразии [31] позволяет дать общее сопоставление полученных результатов по двум этим крупным регионам планеты.

А. Отмечается хорошая общая корреляция полученных результатов распределения величин $r_{\text{рус}}$ по высотным группам речных бассейнов (табл. 4), что позволяет предположить универсальный характер полученных закономерностей для всего умеренного пояса Северного полушария Земли: относительный максимум доли русловых наносов в реках равнин и относительный минимум – в среднегорных речных бассейнах.

Б. Сопоставлением также подтверждается факт некоторого роста $r_{\text{рус}}$ при увеличении размеров реки (площади речных бассейнов), что лучше выражено на равнинах и в низкогорьях (табл. 5). В гидрологическом смысле эта тенденция отражает изменения характеристик уравнения (2) русловых наносов, в частности – степенного показателя n этого уравнения (табл. 6).

В. Распределение $r_{\text{рус}}/r_{\text{бас}}$ рек различных природных (ландшафтных) зон равнин США имеет, в целом, ту же тенденцию, что и в Северной Евразии (табл. 7). Относительный максимум $r_{\text{рус}}$ приурочен к лесным зонам умеренного пояса. В настоящее время мы не можем пока подтвердить факт сравнительно большой роли

Таблица 4

Сравнение средней доли русловой составляющей в стоке взвешенных наносов ($r_{\text{рус}}$, %) по высотным группам речных бассейнов США и Северной Евразии (в скобках – количество речных бассейнов)

Регионы планеты	Высотные группы			В целом
	равнинные	низкогорные	среднегорные	
США	10.6±1.7 (109)	5.7±1.5 (84)	4.3±1.5 (31)	7.9±1.1 (224)
Северная Евразия	10.4±1.5 (213)	4.9±0.9 (150)	4.0±0.8 (97)	7.2±0.8 (460)

Сравнение средней доли русловой составляющей в стоке взвешенных наносов ($r_{\text{рус}}$, %) рек с разной площадью бассейнов по их высотным группам на территориях США и Северной Евразии (в скобках – количество речных бассейнов)

Высотные группы	Регионы планеты	Речные бассейны, км ²		
		менее 2000	2000–25000	более 25000
Равнинные	США	9.9±2.3 (50)	10.8±3.5 (32)	12.3±3.4 (27)
	Северная Евразия	8.2±2.0 (59)	10.9±2.1 (113)	12.1±4.1 (41)
Низкогорные	США	3.9±1.8 (44)	8.7±3.3 (28)	5.6±1.8 (12)
	Северная Евразия	4.1±0.9 (82)	5.7±1.7 (58)	7.1±3.7 (10)
Среднегорные	США	3.3±3.9 (9)	1.9±2.7 (5)	4.7±1.5 (17)
	Северная Евразия	3.9±0.8 (68)	4.2±1.7 (28)	3.6±0.0 (1)
В целом	США	6.7±1.9 (103)	9.3±2.3 (65)	8.6±2.1 (56)
	Северная Евразия	5.2±0.7 (209)	8.5±1.4 (199)	11.0±3.6 (52)

Таблица 6

Изменения степенного показателя n уравнения (2) русловых взвешенных наносов по площадным группам речных бассейнов США и Северной Евразии

Регионы планеты	Речные бассейны (км ²)			В целом
	менее 2000	2000–25000	более 25000	
США	1.36±0.10	1.25±0.13	1.16±0.15	1.28±0.07
Северная Евразия	2.02±0.11	1.72±0.09	1.57±0.14	1.85±0.07

русловой составляющей стока наносов рек зон тундры и тайги (со смешанными лесами), что отмечается на территории Северной Евразии [31]. Это связано с отсутствием или слабой представительностью (лишь 1 бассейн в таежной зоне) проанализированных речных бассейнов по этим ландшафтно-климатическим единицам на территории США в связи с географическим положением страны. Наименьшими показателями доли русловых наносов отличаются семиаридные и аридные ландшафты равнин, в которых величина $r_{\text{рус}}$ не превышает 1–6%.

Г. По двум регионам устанавливается обратная гиперболическая зависимость между фактическим стоком взвешенных наносов рек и долей русловых наносов в нем, которая особо эффек-

Таблица 7

Распределение средней доли русловой составляющей в стоке взвешенных наносов ($r_{\text{рус}}$, %) рек США и Северной Евразии по природным зонам равнин (в скобках – количество речных бассейнов)

Природные зоны	Регионы планеты	
	США	Северная Евразия
Тундра	нет данных	15.0±9.6 (5)
<i>Умеренный пояс</i>		
Тайга и смешанный лес	10.2±0.0 (1)	16.6±3.1 (80)
Широколиственный лес	13.4±3.4 (30)	8.9±2.0 (28)
Лесостепь	7.3±2.3 (27)	5.2±1.6 (51)
Степь	6.0±1.2 (23)	4.5±1.3 (37)
Полупустыня	нет данных	0.8±0.0 (1)
<i>Субтропический пояс</i>		
Степь	2.9±3.8 (2)	нет данных
Лесостепь	6.8±8.3 (3)	нет данных
Лес	14.5±6.1 (14)	нет данных
<i>Тропический пояс</i>		
Лес	6.7±2.7 (5)	нет данных

тна на равнинах. По всем высотным группам речных бассейнов отмечается наличие т.н. “мертвой” зоны формирования русловых взвешенных наносов (их отсутствие или крайне ничтожное присутствие в речных водах при использовании среднемесячных показателей стока взвешенных наносов) при малой внутригодовой неравномерности стока воды рек, выраженной через коэффициент вариации среднемесячных величин стока воды $C_v(Q)$, который не превосходит, в целом, 35–60%.

Заключение

Проведенный анализ позволяет сделать следующие основные выводы.

1. Руслловая составляющая эрозии (транзитной эрозии) в речных бассейнах США, оцененная по стоку взвешенных наносов рек страны, в среднем не превосходит 10–11%, постепенно уменьшаясь от равнинных бассейнов к горным.

2. На соотношение руслловой и бассейновой составляющих эрозии и стока взвешенных наносов оказывают влияние, помимо геоморфологического фактора, также ландшафтно-климатические условия речных бассейнов. Это отчетливо (особенно на равнинах) проявляется в природной зональности данного соотношения. Наибольшие показатели руслловой составляющей в стоке взвешенных наносов присущи лесным зонам умеренного и субтропического поясов, наименьшие — для семиаридных и аридных (полупустыни) климатических условий. Внутри этой общей тенденции наблюдаются достаточно сильные вариации соотношения $r_{\text{русл}}/r_{\text{бас}}$ в связи с изменениями площадей речных бассейнов, агрикультурной деятельности человека и литологического состава русллоформирующих наносов и пойм.

3. Устанавливается обратная гиперболическая зависимость между общим стоком взвешенных наносов рек и долей в нем наносов русллового происхождения. Она получила лучшее выражение на равнинах и в низкогорьях США.

4. По анализируемым речным бассейнам США не выявлена значимая роль литологического фактора (пород, слагающих поверхность речных бассейнов) в формировании руслло-бассейновой структуры стока взвешенных наносов, т.к. по всем литологическим комплексам пород отмечаются высокие величины (свыше 85%) бассейновой составляющей в речном стоке наносов.

5. Сопоставление оценок $r_{\text{русл}}/r_{\text{бас}}$ и их факторной обусловленности по рекам США и Северной Евразии позволяет выявить хорошую сходимость полученных результатов по двум регионам планеты и предположить универсальный характер установленных закономерностей (суммарно по 684 речным бассейнам) для всего умеренного (частично субтропического и тропического) пояса Северного полушария Земли.

Благодарности. Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

Acknowledgements. The study was funded by the subsidy allocated to Kazan Federal University as part of the state program for increasing its competitiveness among the World's leading centers of science and education.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копалиани З.Д. О соотношении расходов донных и взвешенных наносов в реках // Гидрофизические процессы в реках и водохранилищах. М.: Наука, 1985. С. 143–147.
2. Чалов Р.С. Руслловедение: теория, география, практика. Т. 1. Руслловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 608 с.
3. Дедков А.П., Мозжерин В.И. Эрозия и сток наносов на Земле. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1984. 264 с.
4. Meade R.H. Sources sinks, and storage of river sediment in Atlantic drainage of the United States // Journal of Geology. 1982. Vol. 90. No. 3. P. 235–252.
5. Phillips J.D. Fluvial sediment budgets in the North Carolina Piedmont // Geomorphology. 1991. No. 4. P. 231–241.
6. Williams D. Tillage as a conservation tool // Amer. Soc. Agr. Engineers. 1967. No. 70. P. 56–57.
7. US Census of Agriculture. Washington: US Department of Agriculture. 1982. Vol. 1. 434 p.

8. Natural Resources Conservation Service / Summary Report, 1997. National Resource Inventory. Washington. 2000.
9. Renwick W.H., Smith S.V., Bartley J.D., and Buddemeier R.W. The role of impoundments in the sediment budget of the conterminous United States // *Geomorphology*. 2005. No. 71. P. 99–111.
10. Львович М.И., Карасик Г.Я., Братцева Н.Л., Медведева Г.П., Мелешко А.В. Современная интенсивность внутриконтинентальной эрозии суши земного шара // *Результаты исследований по междунар. геофизическим проектам*. М.: Межвед. геофиз. комитет, 1991. 336 с.
11. Ewing R. Postfire suspended sediment from Yellowstone National Park, Wyoming // *Water Resources Bulletin*. 1996. Vol. 32. Iss. 3. P. 605–627.
12. Langlois J.L., Johnson D.W., and Mehuys G.R. Suspended sediment dynamics associated with snowmelt runoff in a small mountain stream of Lake Tahoe (Nevada) // *Hydrological Processes*. 2005. Vol. 19. Iss. 18. P. 3569–3580. DOI: 10.1002/hyp.5844.
13. Allmendinger N.E., Pizzuto J.E., Moglen G.E., and Lewicki M. A sediment budget for an urbanizing watershed, 1951–1996, Montgomery County, Maryland, U.S.A. // *Journal of the American Water Resources Association*. 2007. Vol. 43. Iss. 6. P. 1483–1498. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2007.00122.x.
14. Juracek K.E. and Ziegler A.C. Estimation of sediment sources using selected chemical tracers in the Perry Lake basin, Kansas, USA // *International Journal of Sediment Research*. 2009. Vol. 24. Iss. 1. March 2009. P. 108–125.
15. Schenk E.R. and Hupp C.R. Legacy effects on colonial millponds on floodplain sedimentation, bank erosion, and channel morphology, Mid-Atlantic, USA // *Journal of the American Water Resources Association*. 2009. Vol. 45. Iss. 3. June 2009. P. 597–606.
16. Ritchie J.C., Nearing M.A., and Rhoton F.E. Sediment budget and sources determinations using fallout Cesium-137 in a semiarid rangeland watershed, Arizona, USA // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2009. Vol. 100. Iss. 8. August 2009. P. 637–643.
17. Devereux O.H., Prestegard K.L., Needelman B.A., and Gellis A.C. Suspended sediment sources in an urban watershed, Northeast Branch Anacostia River, Maryland // *Hydrological Processes*. 2010. Vol. 24. Iss. 11. May 2010. P. 1391–1403.
18. Mukundan R., Radcliffe D.E., and Ritchie J.C. Channel stability and sediment source assessment in streams draining a Piedmont watershed in Georgia, USA // *Hydrological Processes*. 2011. Vol. 25. Iss. 8. April 2011. P. 1243–1253.
19. Schilling K.E., Isenhardt T.M., Palmer J.A., Wolter C.F., and Spooner J. Impact of Land-Cover Change on Suspended Sediment Transport in Two Agricultural Watersheds // *Journal of the American Water Resources Association*. 2011. Vol. 47. Iss. 4. August 2011. P. 672–686.
20. Tufekcioglu M., Isenhardt T.M., Schultz R.C., Bear D.A., Kovar J.L., and Russell J.R. Sream bank erosion as a source of sediment and phosphorus in grazed pastures of the Rathbun Lake Watershed in southern Iowa, United States // *Journal of Soil and Water Conservation*. 2012. Vol. 67. Iss. 6. November 2012. P. 545–555.
21. Mukundan R., Pradhanang S.M., Schneiderman E.M., Pierson D.C., Anandhi A., Zion M.S., Matonse A.H., Lounsbury D.G., and Steenhuis T.S. Suspended sediment source areas and future climate impact on soil erosion and sediment yield in a New York City water supply watershed, USA // *Geomorphology*. 2013. Vol. 183. February 2013. P. 110–119.
22. Gao P., Nearing M.A., and Commons M. Suspended sediment transport at the instantaneous and event time scales in semiarid watersheds of southeastern Arizona, USA // *Water Resources Research*. 2013. Vol. 49. Iss. 10. October 2013. P. 6857–6870.
23. McKee L.J., Lewicki M., Schoellhamer D.H., and Ganju N.K. Comparison of sediment supply to San Francisco Bay from watersheds draining the Bay Area and the Central Valley of California // *Marine Geology*. 2013. Vol. 345. November 2013. P. 47–62.
24. Warrick J.A., Melack J.M., and Goodbridge B.M. Sediment yields from small, steep coastal watersheds of California // *Journal of Hydrology: Regional Studies*. Vol. 4. September 2015. P. 516–534.
25. Odgaard A.J. Bank erosion contribution to stream sediment load / IIHR Report (Iowa Institute of Hydraulic Research). 1984. Iss. 280. August 1984. 92 p.
26. Fraley L.M., Miller A.J., and Welty C. Contribution of in-channel processes to sediment yield of an urbanizing watershed // *Journal of the American Water Resources Association*. Vol. 45. Iss. 3. June 2009. P. 748–766.
27. Gellis A.C. and Noe G.B. Sediment source analysis in the Linganore Creek watershed,

Maryland, USA, using the sediment fingerprinting approach: 2008 to 2010 // *Journal of Soils and Sediments*. Vol. 13. Iss. 10, December 2013. P. 1735–1753.

28. U.S. Geological Survey – <https://www.usgs.gov>
29. Гусаров А.В. Определение минимальной продолжительности ряда наблюдений за стоком взвешенных наносов рек с целью корректной оценки пространственно-временной изменчивости интенсивности эрозии в их бассейнах // *Геоморфология*. 2017. № 1. С. 19–29. DOI: 10.15356/0435-4281-2017-1-19-29.
30. Гусаров А.В. Оценка русловой и бассейновой составляющих эрозии и стока взвешенных наносов в речных бассейнах // *Геоморфология*. 2013. № 2. С. 23–39. DOI: 10.15356/0435-4281-2013-2-23-38.
31. Гусаров А.В. Основные закономерности соотношения русловой и бассейновой составляющих эрозии и стока взвешенных наносов в речных бассейнах Северной Евразии // *Геоморфология*. 2015. № 4. С. 3–20. DOI:10.15356/0435-4281-2015-4-3-20.
32. Русловой режим рек Северной Евразии (в пределах бывшего СССР) / Под ред. Р.С. Чалова. М.: Изд-во МГУ, 1994. 336 с.
33. Gray L.S. *History of Agriculture in the Southern United States to 1860*. Gloucester: Peter Smith. 1958. 1086 p.
34. Nicks A.D., Lane L.J., Gander G.A., and Manetsch C. Regional analysis of precipitation and temperature trends using gridded climate station data // *Advances of Hydro-Science & Engineering*. The University of Mississippi. 1985. Vol. 1. Part 1. P. 497–502.
35. Trimble S.W. Man-induced soil erosion on the Southern Piedmont, 1700–1970. Ankeny, Iowa, Soil Conservation Society of America. 1974. 180 p.
36. Simon A. and Darby S.E. Disturbance, channel evolution and erosion rates: Hotophia Creek, Mississippi // *Management of Landscapes Disturbed by Channel Incision*. The Centre for Computational Hydroscience and Engineering. The University of Mississippi. 1997. P. 476–481.

REFERENCES

1. Kopaliani Z.D. About the relation between the bedload and suspended sediments of rivers, in *Gidrofizicheskiye protsessy v rekah i vodohranilishah* (Hydrophysical processes in rivers and reservoirs). Moscow: Nauka (Publ.), 1985. P. 143–147.
2. Chalov R.S. *Ruslovedeniye: teoriya, geografiya, praktika*. Tom 1: *Ruslovye processy: faktory, mekhanizmy, formy proyavleniya i usloviya formirovaniya rechnih rusel* (Riverbed science: theory, geography, practice. Vol. 1: Riverbed processes, mechanism, forms of manifestations and conditions of formations of riverbeds). Moscow: LKI (Publ.), 2008. 608 p.
3. Dedkov A.P. and Mozherin V.I. *Eroziya i stok nanosov na Zemle* (Erosion and sediment yield on the Earth). Kazan: KGU (Publ.), 1984. 264 p.
4. Meade R.H. Sources, sinks, and storage of river sediment in Atlantic drainage of the United States. *Journal of Geology*. 1982. Vol. 90. No. 3. P. 235–252.
5. Phillips J.D. Fluvial sediment budgets in the North Carolina Piedmont. *Geomorphology*. 1991. No. 4. P. 231–241.
6. Williams D. Tillage as a conservation tool. *Amer. Soc. Agr. Engineers*. 1967. No. 70. P. 56–57.
7. US Census of Agriculture. Washington: US Department of Agriculture. 1982. Vol. 1. 434 p.
8. Natural Resources Conservation Service / Summary Report. 1997. National Resource Inventory, Washington, 2000.
9. Renwick W.H., Smith S.V., Bartley J.D., and Buddemeier R.W. The role of impoundments in the sediment budget of the conterminous United States. *Geomorphology*. 2005. No. 71. P. 99–111.
10. Lvovitch M.I., Karasik G.Y., Bratseva N.P., Medvedeva G.P., and Meleshko A.V. *Sovremennaya intensivnost' vnutrikontinental'noy erozii sushi zemnogo shara. Rezul'taty issledovaniy po mezhdunarodnym geofizicheskim proektam* (Modern inland erosion intensity of the Earth's dry land. The results of studies on the international geophysical projects). Moscow: Mezhd. Geofiz. Komitet (Publ.), 1991. 336 p.
11. Ewing R. Postfire suspended sediment from Yellowstone National Park, Wyoming. *Water Resources Bulletin*. 1996. Vol. 32. Iss. 3. P. 605–627.
12. Langlois J.L., Johnson D.W., and Mehuys G.R. Suspended sediment dynamics associated with snowmelt runoff in a small mountain stream of Lake Tahoe (Nevada). *Hydrological Processes*. 2005. Vol. 19. Iss. 18. P. 3569–3580. DOI: 10.1002/hyp.5844.
13. Allmendinger N.E., Pizzuto J.E., Moglen G.E., and Lewicki M. A sediment budget for an

- urbanizing watershed, 1951–1996, Montgomery County, Maryland, U.S.A. *Journal of the American Water Resources Association*. 2007. Vol. 43. Iss. 6. P. 1483–1498. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2007.00122.x.
14. Juracek K.E. and Ziegler A.C. Estimation of sediment sources using selected chemical tracers in the Perry Lake basin, Kansas, USA. *International Journal of Sediment Research*. 2009. Vol. 24. Iss. 1. March 2009. P. 108–125.
 15. Schenk E.R. and Hupp C.R. Legacy effects on colonial millponds on floodplain sedimentation, bank erosion, and channel morphology, Mid-Atlantic, USA. *Journal of the American Water Resources Association*. 2009. Vol. 45. Iss. 3. June 2009. P. 597–606.
 16. Ritchie J.C., Nearing M.A., and Rhoton F.E. Sediment budget and sources determinations using fallout Cesium-137 in a semiarid rangeland watershed, Arizona, USA. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2009. Vol. 100. Iss. 8. August 2009. P. 637–643.
 17. Devereux O.H., Prestegard K.L., Needelman B.A., and Gellis A.C. Suspended sediment sources in an urban watershed, Northeast Branch Anacostia River, Maryland. *Hydrological Processes*. 2010. Vol. 24. Iss. 11. May 2010. P. 1391–1403.
 18. Mukundan R., Radcliffe D.E. and Ritchie J.C. Channel stability and sediment source assessment in streams draining a Piedmont watershed in Georgia, USA. *Hydrological Processes*. 2011. Vol. 25. Iss. 8. April 2011. P. 1243–1253.
 19. Schilling K.E., Isenhardt T.M., Palmer J.A., Wolter C.F., and Spooner J. Impact of Land-Cover Change on Suspended Sediment Transport in Two Agricultural Watersheds. *Journal of the American Water Resources Association*. 2011. Vol. 47. Iss. 4. August 2011. P. 672–686.
 20. Tufekcioglu M., Isenhardt T.M., Schultz R.C., Bear D.A., Kovar J.L., Russell J.R. Sream bank erosion as a source of sediment and phosphorus in grazed pastures of the Rathbun Lake Watershed in southern Iowa, United States. *Journal of Soil and Water Conservation*. 2012. Vol. 67. Iss. 6. November 2012. P. 545–555.
 21. Mukundan R., Pradhanang S.M., Schneiderman E.M., Pierson D.C., Anandhi A., Zion M.S., Matonse A.H., Lounsbury D.G., and Steenhuis T.S. Suspended sediment source areas and future climate impact on soil erosion and sediment yield in a New York City water supply watershed, USA. *Geomorphology*. 2013. Vol. 183. 1 February 2013. P. 110–119.
 22. Gao P., Nearing M.A., Commons M. Suspended sediment transport at the instantaneous and event time scales in semiarid watersheds of southeastern Arizona, USA. *Water Resources Research*. 2013. Vol. 49. Iss. 10. October 2013. P. 6857–6870.
 23. McKee L.J., Lewicki M., Schoellhamer D.H., and Ganju N.K. Comparison of sediment supply to San Francisco Bay from watersheds draining the Bay Area and the Central Valley of California. *Marine Geology*. 2013. Vol. 345. 1 November 2013. P. 47–62.
 24. Warrick J.A., Melack J.M., and Goodbridge B.M. Sediment yields from small, steep coastal watersheds of California. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2015. Vol. 4. September 01. P. 516–534.
 25. Odgaard A.J. Bank erosion contribution to stream sediment load. IHR Report (Iowa Institute of Hydraulic Research). 1984. Iss. 280. August 1984. 92 p.
 26. Fraley L.M., Miller A.J., and Welty C. Contribution of in-channel processes to sediment yield of an urbanizing watershed. *Journal of the American Water Resources Association*. 2009. Vol. 45. Iss. 3. June 2009. P. 748–766.
 27. Gellis A.C. and Noe G.B. Sediment source analysis in the Linganore Creek watershed, Maryland, USA, using the sediment fingerprinting approach: 2008 to 2010. *Journal of Soils and Sediments*. Vol. 13. Iss. 10. December 2013. P. 1735–1753.
 28. U.S. Geological Survey – <https://www.usgs.gov>
 29. Gusarov A.V. Minimum length of suspended sediment yield time-series for a proper estimation of spatio-temporal variability of erosion rates in river basins. *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2017. No. 1. P. 19–29 (in Russ.). DOI: 10.15356/0435-4281-2017-1-19-29.
 30. Gusarov A.V. Riverbed and basin components of erosion and suspended sediments runoff within river basins: A new method of assessment. *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2013. No. 2. P. 23–38 (in Russ.). DOI: 10.15356/0435-4281-2013-2-23-38.
 31. Gusarov A.V. The main regularities of the ratio between riverbed and basin components of erosion and suspended sediment flux in the Northern Eurasia's river basins. *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2015. No. 4. P. 3–20 (in Russ.). DOI:10.15356/0435-4281-2015-4-3-20.
 32. Ruslovoy rezhim rek Severnoy Evrazii (v predelakh byvshego SSSR) (Riverbed regime of the Northern Eurasia's rivers (within the territory of the former USSR)). R.S. Chalov. Ed. Moscow: MGU (Publ.), 1994. 336 p.

33. Gray L.S. History of Agriculture in the Southern United States to 1860. Gloucester: Peter Smith, 1958. 1086 p.
34. Nicks A.D., Lane L.J., Gander G.A., and Manetsch C. Regional analysis of precipitation and temperature trends using gridded climate station data. *Advances of Hydro-Science & Engineering*. The University of Mississippi, 1985. Vol. 1. Part 1. P. 497–502.
35. Trimble S.W. Man-induced soil erosion on the Southern Piedmont, 1700–1970. Ankeny, Iowa, Soil Conservation Society of America, 1974. 180 p.
36. Simon A. and Darby S.E. Disturbance, channel evolution and erosion rates: Hotophia Creek, Mississippi. *Management of Landscapes Disturbed by Channel Incision*. The Centre for Computational Hydrosience and Engineering. The University of Mississippi, 1997. P. 476–481.