

© 201_ г. А.В. ГУСАРОВ, Л.Ф. МАКСЮТОВА

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ СООТНОШЕНИЯ РУСЛОВОЙ И БАСЕЙНОВОЙ СОСТАВЛЯЮЩИХ ЭРОЗИИ И СТОКА ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ В РЕЧНЫХ БАСЕЙНАХ США И ИХ СОПОСТАВЛЕНИЕ С ТЕРРИТОРИЕЙ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ

Казанский (Приволжский) федеральный университет,

e-mail: avgusarov@mail.ru

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 автором 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 оказывает большое влияние, 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 более 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 русловых наносов, 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 констатировать 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, эрозия, структура эрозии, сток взвешенных наносов, США, Северная Евразия.

Введение

Взвешенные наносы – мелкие, преимущественно минеральные гранулометрические элементы (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 достаточно объективного и точного показателя общей интенсивности эрозии в бассейновых геосистемах в целом и в речных бассейнах в частности. 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 аккумулярованных продуктов неодинакова, что определяется разнообразием геологических, геоморфологических и ландшафтно-климатических условий в бассейнах. Те же продукты механической эрозионной денудации, что выносятся реками за пределы их бассейнов (т.н. продукты транзитной эрозии), 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 эрозионно-денудационной активности и направленности развития рельефа в бассейнах рек только по стоку взвешенных наносов допускают 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 [3]. 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 $50\text{--}100\text{ т/км}^2\times\text{год}$), они далеко не полно отражают общие темпы эрозионных процессов (и объемы смыва) на водосборе. Так, исследования четырех речных бассейнов (с площадью от 1119 до 4217 км^2 и со средним многолетним модулем стока взвешенных наносов $63\text{ т/км}^2\times\text{год}$) в штате 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 [4]. В 1980-е гг. эрозия почв, причинившая к этому моменту значительный ущерб хозяйству страны, существенно изменила отношение к масштабу 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 в среднем по территории США составило 49 т/км^2 за два года). Если в конце 1960-х гг. потери гумусового слоя на полях страны составляли около 3 млрд. тонн [5], то уже к 1982 г. – лишь 2.6 млрд. тонн [6]. И далее, в период с 1982 по 1997 гг. темпы почвенной и ручейковой эрозии на обрабатываемых землях, по модельным (USLE) расчетам, сократились на 30% [7]. 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 $1.67\times 10^9\text{ м}^3/\text{год}$ [8]. Тем не менее, современная картина эрозионной активности в стране все еще заметно отлича-

ется от той, что была до европейской колонизации континента, и по пространственному распределению речного стока взвешенных наносов в США выделяют (по [9, 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 (Большой бассейн, Большие пустыни и др.) 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 поубавился. Это отражается в некотором 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 – выделение 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). В отчете резюмируется, основываясь на анализе аэрофотоснимков, карт и гидрологических данных, что из всей массы взвешенных наносов, покидающих с речными водами территорию штата 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 Valley Creek, расположенного на территории Национального исторического парка в штате Пенсильвания, вклад (по 4-летним 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 “fingerprinting”, дана оценка относительного вклада различных потенциальных источников тонкозернистых наносов в малом (147 км²) водосборе 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% – наносы с сельскохозяйственных полей, и 3% – с земель под лесом. Даже такой немногочисленный ряд работ уже показывает существенный (почти половина) вклад русловой эрозии в формировании стока взвешенных наносов малых водосборов региона. Однако, полученные нами результаты, основанные на использовании гидро-

логического метода, отводят русловой эрозии, в целом по стране, более скромную роль в формировании стока взвешенных наносов рек, хотя от бассейна к бассейну ее оценки могут значительно варьировать. Выявлению основных и общих закономерностей (факторная обусловленность) соотношения русловой и бассейновой составляющих эрозии по стоку взвешенных наносов рек Северной Америки на примере территории США посвящена настоящая работа.

Материал исследования

Материал исследования – результаты многолетних наблюдений (в основном 1950–2014-е гг.) на сети гидрологических станций Геологической службы США (U.S. Geological Survey, <https://www.usgs.gov>) за расходами воды (Q) и взвешенных наносов (R), представленные в виде их среднемесячных величин. Процедуре первоначального отбора было подвергнуто 1776 станций сети. Основные критерии отбора – продолжительность парных наблюдений Q – R (не менее 10 лет) 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 % от всей генеральной 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 штата Аляска), о. Пуэрто-Рико и Гавайские острова, 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 абсолютными высотами от 0 до 500 м), низкогорные (500–2000 м) и среднегор-

ные (более 2000–3500 м) (табл. 1). Средняя продолжительность периода наблюдений на гидрологических станциях незначительно отличается по высотным группам (табл. 1). Дополнительно все проанализированные речные бассейны были разделены по их широтно-зональной и высотно-поясной ландшафтной принадлежности (рис. 2). Разделение бассейнов было проведено (по схеме [9]) также по степени антропогенной (сельскохозяйственной) освоенности их природных ландшафтов на три категории: I (1 балл) категория освоенности – малоизмененные бассейны (в лесных зонах залесенность составляла более 70%, в преимущественно степных зонах распаханность – менее 30%), II (2 балла) категория освоенности – со средней степенью изменения ландшафтов (залесенность для бассейнов лесных зон и распаханность для степных – от 30 до 70%), III (3 балла) категория освоенности – сильно измененные человеком бассейны (распаханность – более 70%) (табл. 1).

Метод исследования

Наиболее полно содержание предложенного автором метода, в том числе и его недостатки, нами ранее изложено в работе [28], и апробировано на реках Северной Евразии [29]. Суть метода следующая. 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:

$$R_i = A_{\text{эп}} I Q_i^m \quad (1)$$

где R_i – теоретический (регрессионный) среднемесячный сток взвешенных наносов за календарный i -месяц с водностью Q_i , $A_{\text{эп}}$ – 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 $A_{эп}$ 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 , 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, до 2–3 точек). 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:

$$r_i = A_{эп} I Q_i^{\mu} \quad (2)$$

где r_i – теоретический (регрессионный) среднемесячный сток взвешенных наносов руслового происхождения, μ – 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 крупно-региональных 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 ($r_{cp}(t_j)$) и, далее, до всего периода наблюдений для анализируемой реки (r_{cp}), и затем соотносятся со средней годовой ($R_{cp}(t_j)$) и среднемноголетней (R_{cp}) величинами фактического речного стока взвешенных наносов. В результате полученная величина $r_{рус} = (r_{cp}/R_{cp}) \times 100\%$ представляет собой долю наносов руслового происхождения в среднем многолетнем фактическом стоке взвешенных наносов реки. Доля бассейновой составляющей стока взвешенных наносов реки будет, соответственно, равна $r_{бас} = 100\% - r_{рус}$.

Результаты исследования

1. Для всех проанализированных рек территории США средняя величина русловой составляющей ($r_{рус}$) 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 $r_{рус} = 7.9 \pm 1.1\%$.

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 $r_{\text{бас}}$ (в среднем выше 90%). Однако указанное обстоятельство вовсе не исключает высокую вариабельность $r_{\text{рус}}/r_{\text{бас}}$ по территории США, особенно, опять-таки, среди равнинных речных бассейнов. Так, для последних доля бассейнов, где в реках отмечается $r_{\text{рус}} > 10\%$ (зафиксированный в этой высотной группе максимум $r_{\text{рус}} = 37.5\%$), составляет 40% (или 44 бассейна из 109), для низких гор (зафиксированный максимум $r_{\text{рус}} = 41.6\%$) – 13% (или 11 бассейнов из 84), а для среднегорий (зафиксированный максимум $r_{\text{рус}} = 10.6\%$) – 3.2% (всего один бассейн из 31). В конкретных примерах максимальные показатели $r_{\text{рус}}$ 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%) – $r_{\text{рус}} = 41.6\%$; 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%) – $r_{\text{рус}} = 37.5\%$; 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%) – $r_{\text{рус}} = 36.5\%$.

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 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 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 отмосткой, и его мутность многократно возрастает [2]. Отметим, что отмостка формируется также у рек равнинного типа в горах (реки межгорных котловин и впадин).

На рисунке 3, на примере двух равновеликих и близких по водоносности малых рек (ручьев) Джeneral Крик и Ворд Крик, протекающих в среднегорьях штата Калифорния, видна крайне невысокая доля руслового стока взвешенных наносов (менее 1%), обусловленная весьма слабой эрозией в валунно-галечных руслах. Тем не менее, если судить по многолетним модулям стока взвешенных наносов двух рек, суммарная транзитная эрозия в бассейне р. Ворд в 3.5 раза сильнее, чем в бассейне р. Джeneral, притом что оба бассейна характеризуются высокой лесистостью (соответственно 78.5% и 76.9%; обрабатываемые земли в бассейнах рек отсутствуют). Их фактический сток наносов практически полностью обусловлен сильной почвенно-овражной

эрозией на 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 между собой (различаются лишь в 1.7 раза) модули стока взвешенных наносов двух равновеликих рек, водность которых отличается при этом в 9.4 раза. Основная причина здесь заключается в том, что бассейн р. Грин Ривер расположен в семиаридных климатических условиях, хотя и с незначительной антропогенной нагрузкой на его ландшафты (лесистость – около 9%, обрабатываемые земли – около 3%, территории под населенными пунктами – 0.7%), что обуславливает естественную бассейновую эрозию на большей части его площади. С другой стороны, бассейн р. Кутенай Ривер – гумидный (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 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 следуют иной схеме: скорости размыва в р. Кутенай Ривер лишь в два раза превосходят таковые в р. Грин Ривер (суда по расходам русловых наносов), хотя, согласно соотношению водоносности рек (соответственно 47.9 и 430.4 м³/с), они должны быть существенно выше. Главной причиной этого является, скорее всего, дважды 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 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 равнин (особенно низменных) преимущественно песчаным, песчано-илистым, илистым и илисто-органическим аллювием – обстоятельство, которое, напротив, благоприятствует интенсивной русловой эрозии (главным образом, плановые деформации) и повышает величину $r_{\text{рус}}$ (рис. 5). Увеличение средних показателей $r_{\text{рус}}$ 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-климатически обусловлено. Это наиболее выражено на равнинах (широтная зональность).

На равнинах США наибольшая средняя доля $r_{\text{рус}}$ отмечается в лесных зонах умеренного пояса (тайга, смешанный и широколиственный 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 хвойным или хвойно-лиственным опадом, образующим мощную лесную подстилку), так и антропогенными (относительно слабая, в целом, агрикультурная освоенность данных природных зон) причинами (рис. 6). В семиаридных ландшафтах (лесостепь и степь) умеренного и субтропического поясов усредненная величина $r_{\text{рус}}$ изменяется от 3 до 7%, снижаясь в зонах полупустынь до менее чем 1%. Столь низкие величины $r_{\text{рус}}$ в полупустынях, помимо естественной обусловленности (слабая противозерозионная роль разреженного растительного покрова), связаны с относительно хорошей

их хозяйственной (прежде всего пастбища) освоенностью, особенно в субтропическом поясе США. В речных бассейнах под тропическими лесами (о. Пуэрто-Рико, Гавайские о-ва) $r_{\text{рус}}$ составляет около 6–7% при большой вариативности оценок в связи с различным характером хозяйственного преобразования здесь природных ландшафтов. Для низкогорий США характерна, в целом, схожая тенденция распределения $r_{\text{рус}}$, но в умеренном климатическом поясе с относительным пиком в степной зоне.

3. В целом также наблюдается слабовыраженная тенденция увеличения доли русловой составляющей $r_{\text{рус}}$ 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 процента¹ до 42% и потенциально более, в зависимости от комбинации природных и антропогенных факторов. Выше $1250 \text{ т/км}^2 \times \text{год}$ $r_{\text{рус}}$ 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 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

¹ Наряду с гидролого-ландшафтными особенностями речных бассейнов причиной малых величин руслового компонента R может быть их геоморфологическое расположение – пересечение реками возвышенных участков равнин, которое обеспечивает более грубый (песчано-галечный и галечный) состав руслообразующих наносов, сдерживающий активные русловые деформации, как это наблюдается, к примеру, на реках Северной Евразии [30]. В ряде случаев естественная зарегулированность стока рек равнин озерами и болотами накладывает дополнительные ограничения русловым деформациям и формированию наносов руслового происхождения.

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 эрозии и стока наносов в речных бассейнах США. В тоже время, отдельные примеры могут быть наглядными. Так, установленные сравнительно высокие величины $r_{рус}$ ряда равнинных рек востока и центра США могут иметь следующее объяснение, связанное именно с антропогенным фактором. В начале XIX века интенсивные и, порой, катастрофические [31] эрозионные процессы на междуречьях региона (в частности, на западных предгорных равнинах Аппалачей) охватили большие площади в связи возделыванием хлопчатника в сочетании с наибольшей для США интенсивностью и повторяемостью ливневых осадков здесь [32]. Аккумуляция продуктов бассейновой эрозии вызвала сильное заиление днищ речных долин, вплоть до рек 3-5 порядков [33], 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 заилению днищ долин более высоких порядков, расположенных ниже по течению. К примеру, об одной из таких малых рек – р. Хотофия (Hotophia Creek, шт. Миссисипи, $r_{рус} = 37.5\%$), упомянутой нами ранее, писали американские коллеги [34]. Продолжение этих процессов, но уже в более ослабленной форме, мы видим, возможно, и в последние десятилетия, судя по величинам $r_{рус}$ ряда рек.

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 на превосходят 200% (в низкогорном поясе – и до 400%), однако наибольший разброс оценок $r_{\text{рус}}$ отмечается в равнинной группе, что определено, прежде всего, с разнообразием природно-антропогенных ландшафтов здесь (рис. 8).

Анализ рисунка 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 рек (до 65–70%) не отмечается, по анализируемым рекам, присутствие взвешенных наносов руслового происхождения в общем (фактическом) стоке взвешенных наносов (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 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 (рис. 8).

6. По рекам США не выявлена 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. Одни из вероятных причин этого мы объяснили ранее [29].

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

7.1. Отмечается хорошая общая корреляция полученных результатов распределения величин $r_{\text{рус}}$ по высотным группам речных бассейнов (табл. 4), что позволяет утверждать 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.

7.2. Сопоставлением также подтверждается факт некоторого роста $r_{\text{рус}}$ при увеличении размеров реки (площади 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 μ этого уравнения (табл. 6).

7.3. 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 пояса². В настоящее время мы не можем пока подтвердить факт сравни-

² Согласно В.Н. Голосову [35], максимальный прирост стока взвешенных наносов рек Восточно-Европейской равнины в связи увеличением вклада бассейновой составляющей наблюдается в лесостепной зоне – в среднем до 80%, в то время как для юга лесного пояса – до 60% (в пределах интенсивно распаханых бассейнов).

тельно большой роли русловой составляющей стока наносов рек зон тундры и тайги (со смешанными лесами), что отмечается на территории Северной Евразии [29]. 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 территории равнин, в которых величина $r_{\text{рус}}$ не превышает 1–6%.

7.4. По двум регионам отмечается обратная гиперболическая зависимость между фактическим стоком взвешенных наносов рек и долей русловых наносов в нем, которая особо эффектна на равнинах. По все 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. Русловая составляющая 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 русловой и бассейновой составляющих эрозии и стока взвешенных наносов оказывает влияние, помимо геоморфологического фактора, также ландшафтно-климатические условия речных бассейнов. Это отчетливо (особенно на равнинах) проявляется в природной зональности данного соотношения. Наибольшие показатели русловой составляющей в стоке взвешенных наносов присущи лесным зонам умеренного и субтропи-

ческого поясов, наименьшие – для семиаридных климатических условий. Внутри этой общей тенденции 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.

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

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

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

Благодарности. Отдельные разделы работы выполнены при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 15–17–20006).

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.* Русловедение: теория, география, практика. Т. 1. Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 608 с.
3. *Meade R.H.* Sources sinks, and storage of river sediment in Atlantic drainage of the United States // *Journal of Geology*, 1982. V. 90, no. 3, pp. 235–252.
4. *Phillips J.D.* Fluvial sediment budgets in the North Carolina Piedmont // *Geomorphology*, 1991, no. 4, pp. 231–241.
5. *Williams D.* Tillage as a conservation tool // *Amer. Soc. Agr. Engin.*, 1967, no. 70, pp. 56–57.
6. US Census of Agriculture. Washington: US Department of Agriculture, 1982, V. 1, 434 p.
7. Natural Resources Conservation Service / Summary Report, 1997, National Resource Inventory, Washington, 2000.
8. *Renwick W.H., Smith S.V., Bartley J.D., Buddemeier R.W.* The role of impoundments in the sediment budget of the conterminous United States // *Geomorphology*, 2005, no. 71, pp. 99–111.
9. *Дедков А.П., Мозжерин В.И.* Эрозия и сток наносов на Земле. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1984. 264 с.
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, V. 32, Issue 3, pp. 605–627.
12. *Langlois J.L., Johnson D.W., Mehuys G.R.* Suspended sediment dynamics associated with snowmelt runoff in a small mountain stream of Lake Tahoe (Nevada) // *Hydrological Processes*, 2005, V. 19, Issue 18, pp. 3569–3580, doi: 10.1002/hyp.5844
13. *Allmendinger N.E., Pizzuto J.E., Moglen G.E., 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, V. 43, Issue 6, pp. 1483–1498, doi: 10.1111/j.1752-1688.2007.00122.x

14. *Juracek K.E., Ziegler A.C.* Estimation of sediment sources using selected chemical tracers in the Perry Lake basin, Kansas, USA // *International Journal of Sediment Research*, 2009, V. 24, Issue 1, March 2009, pp. 108–125.
15. *Schenk E.R., 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, V. 45, Issue 3, June 2009, pp. 597–606.
16. *Ritchie J.C., Nearing M.A., Rhoton F.E.* Sediment budget and sources determinations using fallout Cesium-137 in a semiarid rangeland watershed, Arizona, USA // *Journal of Environmental Radioactivity*, 2009, V. 100, Issue 8, August 2009, pp. 637–643.
17. *Devereux O.H., Prestegard K.L., Needelman B.A., Gellis A.C.* Suspended sediment sources in an urban watershed, Northeast Branch Anacostia River, Maryland // *Hydrological Processes*, 2010, V. 24, Issue 11, May 2010, pp. 1391–1403.
18. *Mukundan R., Radcliffe D.E., Ritchie J.C.* Channel stability and sediment source assessment in streams draining a Piedmont watershed in Georgia, USA // *Hydrological Processes*, 2011, V. 25, Issue 8, April 2011, pp. 1243–1253.
19. *Schilling K.E., Isenhardt T.M., Palmer J.A., Wolter C.F., Spooner J.* Impact of Land-Cover Change on Suspended Sediment Transport in Two Agricultural Watersheds // *Journal of the American Water Resources Association*, 2011, V. 47, Issue 4, August 2011, pp. 672–686.
20. *Tufekcioglu M., Isenhardt T.M., Schultz R.C., Bear D.A., Kovar J.L., Russell J.R.* Stream 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, V. 67, Issue 6, November 2012, pp. 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., 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, V. 183, 1 February 2013, pp. 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, V. 49, Issue 10, October 2013, pp. 6857–6870.
23. *McKee L.J., Lewicki M., Schoellhamer D.H., 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, V. 345, 1 November 2013, pp. 47–62.

24. *Warrick J.A., Melack J.M., Goodbridge B.M.* Sediment yields from small, steep coastal watersheds of California // *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2015, V. 4, September 01, pp. 516–534.
25. *Odgaard A.J.* Bank erosion contribution to stream sediment load / IHR Report (Iowa Institute of Hydraulic Research), 1984, Issue 280, August 1984, 92 p.
26. *Fraley L.M., Miller A.J., Welty C.* Contribution of in-channel processes to sediment yield of an urbanizing watershed // *Journal of the American Water Resources Association*, 2009, V. 45, Issue 3, June 2009, pp. 748–766.
27. *Gellis A.C., 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*, V. 13, Issue 10, December 2013, pp. 1735–1753.
28. *Гусаров А.В.* Оценка русловой и бассейновой составляющих эрозии и стока взвешенных наносов в речных бассейнах // *Геоморфология*. 2013. № 2. С. 23–39.
29. *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.
30. *Русловой режим рек Северной Евразии (в пределах бывшего СССР) / Под ред. Р.С. Чалова.* М.: МГУ, 1994. 336 с.
31. *Gray L.S.* History of Agriculture in the Southern United States to 1860. Gloucester: Peter Smith, 1958, 1086 pp.
32. *Nicks A.D., Lane L.J., Gander G.A., Manetsch C.* Regional analysis of precipitation and temperature trends using gridded climate station data // *Advances of Hydro-Science & Engineering*. The University of Mississippi, 1985, V. 1, Part 1, pp. 497–502.
33. *Trimble S.W.* Man-induced soil erosion on the Southern Piedmont, 1700–1970. Ankeny, Iowa, Soil Conservation Soc. Amer., 1974. 180 pp.
34. *Simon A., 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, pp. 476–481.
35. *Голосов В.Н.* Эрозионно-аккумулятивные процессы в речных бассейнах освоенных равнин. М.: ГЕОС, 2006. 296 с.

REFERENCES

1. Kopaliani Z.D. *O sootnoshenii rashodov donnyh i vzheshennyh nanosov v rekah // Gidrofizicheskiye processy v rekah i vodohranilishah* (On the relation between the bedload and suspended sediments of rivers // Hydrophysical processes in rivers and reservoirs). Moscow: Nauka (Publ.), 1985, pp. 143–147 (in Russ.).
2. Chalov R.S. *Ruslovedeniye: teoria, geografia, praktika. Tom 1: Ruslovye processy: faktory, mekhanizmy, formy proyavleniya i usloviya formirovaniya rechnih rusel* (Riverbed sciences: theory, geography, practice. Vol. 1: Riverbed processes, mechanism, forms of manifestations and conditions of formations of the riverbeds). Moscow: LKI (Publ.), 2008, 608 p.
3. Meade R.H. Sources, sinks, and storage of river sediment in Atlantic drainage of the United States. *Journal of Geology*, 1982, V. 90, no. 3, pp. 235–252.
4. Phillips J.D. Fluvial sediment budgets in the North Carolina Piedmont. *Geomorphology*, 1991, no. 4, pp. 231–241.
5. Williams D. Tillage as a conservation tool. *Amer. Soc. Agr. Engin.*, 1967, no. 70, pp. 56–57.
6. US Census of Agriculture. Washington: US Department of Agriculture, 1982, V. 1, 434 p.
7. Natural Resources Conservation Service / Summary Report, 1997, National Resource Inventory, Washington, 2000.
8. Renwick W.H., Smith S.V., Bartley J.D., Buddemeier R.W. The role of impoundments in the sediment budget of the conterminous United States. *Geomorphology*, 2005, no. 71, pp. 99–111.
9. Dedkov A.P., Mozzherin V.I. *Eroziya i stok nanosov na Zemle* (Erosion and sediment yield on the Earth). Kazan: KGU (Publ.), 1984, 264 p.
10. Lvovitch M. I., Karasik G.Y., Bratseva N.P., Medvedeva G.P., Meleshko A.V. *Sovremennaya intensivnost' vnutrikontinental'noy erozii sushy zemnogo shara. Rezul'taty issledovaniy po mezhdunarodnym geofizicheskim proektam* (Modern inland erosion intensity of the Earth's land. The results of studies on the international geophysical projects). Moscow: Interdepartmental Geophysical Committee (Publ.), 1991, 336 p.
11. Ewing R. Postfire suspended sediment from Yellowstone National Park, Wyoming. *Water Resources Bulletin*, 1996, V. 32, Issue 3, pp. 605–627.
12. Langlois J.L., Johnson D.W., Mehuis G.R. Suspended sediment dynamics associated with snowmelt runoff in a small mountain stream of Lake Tahoe (Nevada). *Hydrological Processes*, 2005, V. 19, Issue 18, pp. 3569–3580, doi: 10.1002/hyp.5844
13. Allmendinger N.E., Pizzuto J.E., Moglen G.E., Lewicki M. A sediment budget for an urbanizing watershed, 1951–1996, Montgomery County, Maryland, U.S.A. *Journal of the Ameri-*

- can Water Resources Association*, 2007, V. 43, Issue 6, pp. 1483–1498, doi: 10.1111/j.1752-1688.2007.00122.x
14. Juracek K.E., Ziegler A.C. Estimation of sediment sources using selected chemical tracers in the Perry Lake basin, Kansas, USA. *International Journal of Sediment Research*, 2009, V. 24, Issue 1, March 2009, pp. 108–125.
 15. Schenk E.R., 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, V. 45, Issue 3, June 2009, pp. 597–606.
 16. Ritchie J.C., Nearing M.A., Rhoton F.E. Sediment budget and sources determinations using fallout Cesium-137 in a semiarid rangeland watershed, Arizona, USA. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2009, V. 100, Issue 8, August 2009, pp. 637–643.
 17. Devereux O.H., Prestegard K.L., Needelman B.A., Gellis A.C. Suspended sediment sources in an urban watershed, Northeast Branch Anacostia River, Maryland. *Hydrological Processes*, 2010, V. 24, Issue 11, May 2010, pp. 1391–1403.
 18. Mukundan R., Radcliffe D.E., Ritchie J.C. Channel stability and sediment source assessment in streams draining a Piedmont watershed in Georgia, USA. *Hydrological Processes*, 2011, V. 25, Issue 8, April 2011, pp. 1243–1253.
 19. Schilling K.E., Isenhardt T.M., Palmer J.A., Wolter C.F., Spooner J. Impact of Land-Cover Change on Suspended Sediment Transport in Two Agricultural Watersheds. *Journal of the American Water Resources Association*, 2011, V. 47, Issue 4, August 2011, pp. 672–686.
 20. Tufekcioglu M., Isenhardt T.M., Schultz R.C., Bear D.A., Kovar J.L., Russell J.R. Stream 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, V. 67, Issue 6, November 2012, pp. 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., 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, V. 183, 1 February 2013, pp. 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, V. 49, Issue 10, October 2013, pp. 6857–6870.
 23. McKee L.J., Lewicki M., Schoellhamer D.H., 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, V. 345, 1 November 2013, pp. 47–62.

24. Warrick J.A., Melack J.M., Goodbridge B.M. Sediment yields from small, steep coastal watersheds of California. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2015, V. 4, September 01, pp. 516–534.
25. Odgaard A.J. Bank erosion contribution to stream sediment load. *IIHR Report* (Iowa Institute of Hydraulic Research), 1984, Issue 280, August 1984, 92 p.
26. Fraley L.M., Miller A.J., Welty C. Contribution of in-channel processes to sediment yield of an urbanizing watershed. *Journal of the American Water Resources Association*, 2009, V. 45, Issue 3, June 2009, pp. 748–766.
27. Gellis A.C., 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*, V. 13, Issue 10, December 2013, pp. 1735–1753.
28. 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, pp. 23–38 (in Russ.), doi: 10.15356/0435-4281-2013-2-23-38
29. 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, pp. 3–20 (in Russ.), doi:10.15356/0435-4281-2015-4-3-20
30. *Ruslovoy rezhim rek Severnoy Evrazii (v predelah byvshego SSSR)* (Riverbed regime of the Northern Eurasia's rivers (within the territory of the former USSR) / Ed. by R.S. Chalov). Moscow: MGU (Publ.), 1994. 336 p.
31. Gray L.S. *History of Agriculture in the Southern United States to 1860*. Gloucester: Peter Smith, 1958, 1086 pp.
32. Nicks A.D., Lane L.J., Gander G.A., Manetsch C. Regional analysis of precipitation and temperature trends using gridded climate station data. *Advances of Hydro-Science & Engineering*. The University of Mississippi, 1985, V. 1, Part 1, pp. 497–502.
33. Trimble S.W. *Man-induced soil erosion on the Southern Piedmont, 1700–1970*. Ankeny, Iowa, Soil Conservation Soc. Amer., 1974. 180 pp.
34. Simon A., 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, pp. 476–481.
35. Golosov V.N. *Erozionno-akkumulyativnye protsessy v rechnih basseynah osvoennyh ravnin* (Erosion and deposition processes in the river bassins of cultivated plains). Moscow: GEOS (Publ.), 2006, 296 p.

Таблица 1

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
$M(Q)_{\text{ср}}$, л/с×км ²	8.7±1.3	15.1±3.6	4.9±3.4
$M(R)_{\text{ср}}$, т/км ² ×ГОД	254±106	579±153	163±85

N – количество речных бассейнов, F – средняя площадь речных 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 (%), $M(Q)_{\text{ср}}$ ($M(R)_{\text{ср}}$) – средний многолетний модуль стока воды (взвешенных наносов) рек.

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

Таблица 2

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

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

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

Таблица 3

Средние показатели доли русловых наносов ($r_{\text{рус}}$, %) в общем стоке взвешенных наносов разновеликих рек США по высотным группам (в скобках – количество речных бассейнов)

Высотные группы	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)

Таблица 4

Сравнение усредненной доли русловой составляющей в стоке взвешенных наносов ($r_{\text{рус}}$, %) по высотным группам речных бассейнов США и Северной Евразии (по [29]) (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)

Таблица 5

Сравнение усредненной доли русловой составляющей в стоке взвешенных наносов ($r_{рус}$, %) рек с разной площадью бассейнов по их высотным группам на территориях США и Северной Евразии (по [29]) (в скобках – кол-во 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 μ уравнения русловых взвешенных наносов (уравнение (2)) 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

Таблица 7

Распределение усредненной доли русловой составляющей в стоке взвешенных наносов ($r_{рус}$, %) рек США и Северной Евразии (по [29]) по природным зонам равнин (в скобках – кол-во бассейнов)

Природные зоны	Регион 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 (45)	4.5±1.3 (37)
Полупустыня	нет данных	0.8±.00 (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

Подрисуночные подписи

Рис. 1. Карта расположения анализируемых гидрологических станций сети Геологической службы США на реках страны.

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

ТиСЛ – тайга и смешанный лес, ШЛ – широколиственный лес, ЛС – лесостепь, С – степь, ПП – полупустыня, СПП – субтропическая полупустыня, СС – субтропическая степь, СЛС – субтропическая лесостепь, СЛ – субтропический лес, ТЛ – тропический лес, М/з – межзональные бассейны; в кружке – общее кол-во бассейнов в группе.

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 / Тахоэ Пайнс (Ward Creek / Tahoe Pines (шт. Калифорния)), США (фотографии свободного электронного доступа).

Q_i и R_i – среднемесячные расходы воды и взвешенных наносов за период наблюдения; l – линии степенного тренда: l_a – уравнения (1), l_b – уравнения (2); 2 – парные среднемесячные величины Q_i-R_i , отобранные из всего массива данных для построения уравнения (2); R^2 – коэффициент детерминации 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.

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

Рис. 5. Русловая и бассейновая составляющие в стоке взвешенных наносов р. Миссури / Сиукс (Sioux City (шт. Айова)), США (фотография свободного электронного доступа). Усл. обозн. см. рис. 3 и табл.1.

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

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

Рис. 7. Связь между модульными величинами общего стока взвешенных наносов ($M(R)$, т/км²×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 $M(R)$.

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