

Российский фонд фундаментальных исследований
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Географический факультет
Межвузовский научно-координационный совет
по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ЭРОЗИОННЫХ И РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В РАЗЛИЧНЫХ ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЯХ

**Материалы
V Всероссийской научной конференции
с международным участием, объединенной
с XXXIV пленарным совещанием
Межвузовского научно-координационного совета
по проблеме эрозионных, русловых
и устьевых процессов**

г. Москва,
МГУ имени М. В. Ломоносова,
3–6 сентября 2019 г.



URSS
МОСКВА

Редакционная комиссия:

профессор Р. С. Чалов (председатель), к. г. н. С. Н. Рулёва (ученый секретарь),
д. г. н. К. М. Беркович, к. г. н. Н. Н. Виноградова, к. г. н. О. В. Виноградова,
к. г. н. И. И. Никольская, к. г. н. В. В. Иванов, д. г. н. Л. Ф. Литвин,
д. г. н. А. В. Чернов, П. П. Головлев.

Закономерности проявления эрозионных и русловых процессов в различных природных условиях: Материалы V Всероссийской научной конференции с международным участием, объединенной с XXXIV пленарным совещанием Межвузовского научно-координационного совета по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов (г. Москва, МГУ имени М. В. Ломоносова, 3–6 сентября 2019 г.). — М.: ЛЕНАНД, 2019. — 432 с.

Сборник содержит материалы (тексты докладов на пленарном заседании и секциях V Всероссийской научной конференции с международным участием «Закономерности проявления эрозионных и русловых процессов в различных природных условиях», объединенной с XXXIV пленарным совещанием Межвузовского научно-координационного совета по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов при МГУ, состоявшегося 3–6 сентября 2019 г.

Сборник предназначен научным сотрудникам и преподавателям университетов, занимающихся изучением эрозионных и русловых процессов, гидрологам, геоморфологам, почвоведом, географам, широкому кругу специалистов, связанных с земельными и водными ресурсами, рациональным природопользованием, гидро- и агротехникой, защитой земель от эрозии и регулированием речных русел.

Конференция посвящена 50-летию основания научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н. И. Маккавеева географического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова



Конференция проводится при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-05-20047)

Фото на обложке А. М. Тарбеевой (р. Нижняя Тунгуска, Иркутская область)

Формат 60×90/16. Печ. л. 27. Зак. №

Отпечатано в ООО «ЛЕНАНД».

117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 11А, стр. 11.

ISBN 978–5–9710–6973–7

© Коллектив авторов, 2019

© Географический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова, 2019

© Межвузовский научно-координационный совет по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов при МГУ, 2019

25537 ID 253400



9 785971 069737

НАУЧНАЯ И УЧЕБНАЯ ЛИТЕРАТУРА



URSS

E-mail: URSS@URSS.ru

Каталог изданий в Интернете:

<http://URSS.ru>

Тел./факс (многоканальный):
+ 7 (499) 724 25 45

С. Р. Чалов

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Геохимические проявления русловых процессов¹

S. R. Chalov

Moscow state university

Geochemical appearance of channel processes

Русловые процессы – фактор формирования и переноса речных наносов. Они влияют на накопление осадочного материала на водосборных территориях суши и в бассейнах седиментации – седиментогенез [8]. Седиментогенез, в свою очередь – важнейший процесс дифференциация вещества и миграции химических элементов в ландшафтах Земли.

Важнейшую роль в поступлении наносов в реки играют особенности взаимодействия потоков и грунтов, слагающих русла. Соотношения площадных, линейных и точечных источников, природных и техногенных, определяют структуру потоков вещества (наносов, химических элементов), режим и пространственное распределение химического состава речных наносов. Взаимодействие потока и русла проявляется в отложении части перемещаемого материала и их захоронении в составе аллювия. В пределах речных долин происходит дифференциация различных компонент пойменно-русловой системы по химическому составу.

Роль русловых процессов в геохимии ландшафтов следует подразделить на 2 группы: первая – это формирование литолого-минералогических и геохимических характеристик речных наносов и аллювиальных отложений, вторая – их роль в распределении химических элементов в водной толще и донных отложениях.

Влияние русловых переформирований на состав наносов

Современный сток взвешенных наносов рек Мира в моря, океаны и крупные водные объекты суши, оценивается в $19 \cdot 10^9$ т/год [14]. Новые данные по рекам российской Арктики [5] позволяют уточнить его до величины $18,5 \cdot 10^9$ т/год, а вместе с влекомыми наносами суммарный объем стока наносов может оцениваться в $25 \cdot 10^9$ т/год. Это превышает потоки твердого вещества, переносимого в океан другими агентами – ледниковыми потоками ($2 \cdot 10^9$ т/год), ветром ($0,7 \cdot 10^9$ т/год) и в результате абразии морских берегов ($0,4 \cdot 10^9$ т/год) [17], а также объем стока растворенных веществ рек Мира, который оценивается в $4,6 \cdot 10^9$ т/год, из которых на долю ионного стока приходится 3,7 стока 10^9 т/год [3].

Сток наносов включает в себя спектр нерастворенных частиц с крупностью более 0,001 мкм – коллоиды, глинистые, илестые, песчаные и крупнообломочные частицы, являющиеся продуктами разрушения горных

¹ Выполнено при поддержке проекта РНФ18-17-00086. Данные по р. Селенга получены в рамках реализации проекта РФФИ 17-29-05027, по р. Обь – РФФИ 18-05-60219

пород, почв, органических остатков, флокуляции и внутренних процессов. За исключением Ba, Ca, Mg, K, Na, Li, Sr, Sc, Ta, U и W [19], большинство макро-и микроэлементов переносятся реками в составе речных наносов, и, таким образом, их поток формируется при непосредственном участии руслового процесса. Как правило 80-90 % сухого вещества речных наносов представлено оксидами кремния, алюминия, железа, магния, кальция, натрия и калия, образующих подгруппу основных петрогенных элементов [7]. На фоне многолетней и сезонной изменчивости, по преобладанию нахождения элемента в системе взвесь – раствор в крупном речном бассейне могут быть выделены типовые парагенетические ассоциации (по терминологии В.И. Вернадского), т.е. характеризующиеся совместным концентрированием в горных породах. Первая группа - это катионогенные металлы – Fe, Mn, Pb и некоторые литофильные комплексообразователи (элементы – гидролизаты) – Al, Bi, W, Be, мигрирующие в водах преимущественно в сорбированной форме со взвешенным веществом (Касимов, в печати). Вторая группа - анионогенные тяжелые металлоиды – Mo, U, Sb, As, а также легкий металлоид В, находящиеся в основном в растворенной форме (4-я, иногда 3-я группы). Третья группа – микроэлементы Zn, Cd, Cu, а также Sn, фракционирование которых больше зависит от гидроклиматической изменчивости, погодных условий и сезонных колебаний стока, а также ландшафтно-геохимических условий водосборов.

Химический состав речных (взвешенных) наносов наиболее близко соответствует составу глин и глинистых сланцев [7], т.е. речные наносы являются аналогом осадочных пород, которые образовались в прошлые геологические эпохи. В результате размыва берегов и дна рек в реки поступает масса материала $W_{русл}$, что вместе с эрозией на водосборе (склонов и овражной) $W_{эп}$, влиянием техногенных процессов $W_{техн}$, эскарацией ледников $W_{ледн}$ и др. определяет формирование потока взвешенных и влекомых наносов $W_R + W_G$. Часть материала задерживается в водохранилищах $A_{вдхр}$, областях аккумуляции в днищах речных долин $A_{акк}$ и других геохимических ловушках ($A_{др}$). Вклад каждого из процессов формирования и снижения стока наносов относительно величины $W_R + W_G$, определенной для замыкающего створа, характеризует коэффициент редукции стока наносов:

$$K = \frac{W_{эп}}{W_R + W_G} + \frac{W_{русл}}{W_R + W_G} + \frac{W_{техн}}{W_R + W_G} + \frac{W_{овр}}{W_R + W_G} + \frac{W_{ледн}}{W_R + W_G} - \frac{A_{вдхр}}{W_R + W_G} - \frac{A_{акк}}{W_R + W_G} - \frac{A_{др}}{W_R + W_G}, \quad (1)$$

который при учете всех факторов трансформации массопереноса равен 1 ($k=1$). Для оценки вклада русловых процессов в формирование стока наносов подобная модель может быть упрощена до вида

$$W_R + W_G = W_{эп}SDR + SDRW_{овр} + W_{русл} + W_{техн} - A_{вдхр} \quad (2)$$

где SDR - коэффициент доставки наносов, характеризующий долю продуктов эрозии на водосборе, доносимых до русловых потоков и переносимых в

замыкающем створе бассейна. Учитывая непосредственно поступление продуктов размыва берегов и дна рек и сбросов сточных вод в реки, коэффициенты доставки наносов $W_{русл}$ и $W_{техн}$ равны 1. Полученные в последнее время надежные оценки эрозии почв [11] $W_{эр} = 17-18 \cdot 10^9$ т/год, глобальной задержки наносов в водохранилищах [20] $A_{вдхр} = 10 \cdot 10^9$ т/год (около 40 % от суммарного стока наносов), могут быть использованы для оценки $W_{русл}$. Для этого объемы эрозии на водосборе $W_{эр}$ должны быть уменьшены на величину доставки наносов, обычно принимаемой равной от 0.1 до 0.3 [9] (табл. 1). Бассейновая составляющая стока наносов рек мира составит, таким образом, $1,75-5,25 \cdot 10^9$ т/год. Объем техногенного стока наносов $W_{техн}$ может быть оценен на основе принятых осредненных значений сброса сточных вод в реки $A=1760$ км³/год (Асарин и др. 2012), 80 % которых осуществляет без очистки. Используя среднее значение техногенной мутности в неочищенных сточных водах в 100 мг/л, величина $W_{техн}$ составит $0,14 \cdot 10^9$ т/год.

Суммарный объем стока наносов, перемещаемый реками без снижения (задержки) водохранилищами равен $W_R + W_G + A_{вдхр}$, т.е. с учетом приведенных выше данных - $38-40 \cdot 10^9$ т/год. Доля материала, поступающего за счет овражной и русловой эрозии $W_{овр} + W_{русл}$, меняется в диапазоне $33-38 \cdot 10^9$ т/год. При принятии гипотезы о равенстве объемов овражной и русловой эрозии объем русловой эрозии $W_{русл}$ рек мира может оцениваться в $16-18 \cdot 10^9$ т/год, т.е. в 3-4 раза превышающем величину бассейновой составляющей стока наносов $W_{эр}SDR$.

Таблица 1. Роль русловых процессов в формировании глобального выноса вещества в океан

Параметр	Объем, т/год	Источник данных	Поступление в речную сеть т/год	Примечание
$W_{эр}$	$17.5 \cdot 10^9$	Borelli et al, 2017	$5.25 \cdot 10^9$	При (SDR=0.3)
			$3,5 \cdot 10^9$	При (SDR=0.2)
			$1.75 \cdot 10^9$	При (SDR=0.1)
$W_R + W_G$	$25 \cdot 10^9$	Milliman and Farnsworth 2013 с уточнениями для рек РФ	$25 \cdot 10^9$	При оценке стока взвешенных наносов $18,5 \cdot 10^9$ т/год,
$A_{вдхр}$	$10 \cdot 10^9$	Vorosmarty et al., 2003	$10 \cdot 10^9$	40 %
$W_{техн}$	$0,14 \cdot 10^9$ т/год	Sato et al. 2013	$0,14 \cdot 10^9$ т/год	При техногенной мутности $Stехн = 100$ мг/л
Итого оценка $W_{овр} + W_{русл}$			$30-33 \cdot 10^9$ т/год	
Итого оценка $W_{русл}$			$15-16.5 \cdot 10^9$ т/год	

При сопоставлении со среднемировыми оценками химического состава взвеси [19, 7] подобные оценки позволяют оценить вклад русловых процессов непосредственно в объемы выноса $W_{x \text{ русл}}$ (т/год) тех или иных химических веществ:

$$W_{x \text{ русл}} = Cx W_{\text{русл}} \quad (3)$$

где Cx - концентрация (мкг/г) химического элемента x в речных наносах [Viers, Dupré, Gaillardet, 2009; Савенко, 2006]. Для оценки относительного вклада русловых процессов в перенос химического элемента использовано соотношение:

$$X_{\text{русл}} = \frac{W_{x \text{ русл}}}{W_x} (\%) \quad (4)$$

где W_x – суммарный переноса элементов x в составе речных наносов (с учетом задерживаемых в водохранилищах) $W_R + W_G + A_{\text{водхр}}$. Абсолютные значения поступления микроэлементов руслового происхождения, мигрирующих в водах преимущественно в сорбированной форме с взвешенным веществом (катионогенные металлы – Fe, Mn, Pb и некоторые литофильные комплексообразователи (элементы – гидролизаты) – Bi, W, Be) [6], существенно отличаются (табл. 2). Их относительные доли в стоке наносов $W_R + W_G + A_{\text{водхр}}$ составляют 47 % (табл. 2).

Таблица 2. Оценки выноса некоторых микроэлементов за счет русловой эрозии

Элемент	Mn	Pb	Bi	W	Be
Среднее в речных взвесах рек мира, мкг/г (по [Viers, Dupré, Gaillardet, 2009])	1679	61.1	0.85	1.99	1.64
Объем поступления в результате русловой эрозии в реки мира, $W_{x \text{ русл}}, \text{т/год}^*$	$27703 \cdot 10^3$	$1008.15 \cdot 10^3$	$14.02 \cdot 10^3$	$32.835 \cdot 10^3$	$27.06 \cdot 10^3$

При оценке величины суммарного переноса наносов реками

$$W_R + W_G + A_{\text{водхр}} = 35 \cdot 10^9 \text{ т/год}$$

Полученные оценки сопоставлены с данными для бассейна р. Селенги, хорошо изученной как с точки зрения стока и состава наносов, так и особенностей эрозионных и русловых процессов. Оценка объема материала, поступающего в результате размыва берегов $W_{\text{русл}} = 28642 \cdot 10^3$ т/год [4; Завадский и др., в печати], выполненная на основе полуавтоматического ГИС-дешифрирование разновременных снимков LANDSAT, была сопоставлена с измеренными значениями суточных потоков химических элементов W_x (т/сут) [Lychagin et al, 2017]. Используются значения содержания химических соединений в размываемых пойменных массивах

нижнего течения Селенги. На примере свинца Pb показано, что при измеренных значениях в составе береговых отложений $C_{Pb} = 20.4$ мкг/г, потоки $W_{Pb\text{ русл}}$ оцениваются в 1.6 т/сут, в то время как значения потоков свинца в нижнем течении по фактическим измерениям 2011-2016 гг. не превышали для разных фаз водного режима $W_{Pb} = 0.28$ т/сут. Подобное несоответствие объясняется значительной аккумуляцией размываемого вещества непосредственно на прилегающих к размываемым массивам участкам рек, оцениваемых величиной 10 % от объема размыва берега [22]. В таком случае доля потоков свинца, поступающего в результате размыва берегов, составит $W_{Pb\text{ русл}} = 0.16$ т/сут, т.е. около 57 % от общего потока взвешенных наносов. Если в определение W_{Pb} добавить сток влекомых наносов, то оценка $X_{\text{русл}}$ для бассейна Селенги окажется подобной вышеприведенной оценке для рек Мира $X_{\text{русл}} = 47$ %.

Роль русловых процессов в формировании стока и состава наносов может быть также охарактеризована на основе использования косвенных методов. Для рек Англии результаты применения модели «отпечатка пальцев» (fingerprinting) [21] охарактеризовали соотношение различных процессов формирования стока и состава наносов на региональном уровне. В среднем 85–95% состава взвешенных наносов определяются составом грунтов на водосборе, т.е. поступают в реки за счет почвенно-овражной эрозии. Размывы берегов определяют 5–15% состава наносов. При этом для части водосборов вклад русловых деформаций формирует более 40 % стока взвешенных наносов. Аналогичная методика были реализована нами для бассейна Селенги. Состав пойменных отложений нижнего течения (механический и микроэлементный, определенный для 60 химических элементов методом ICP-MS) сравнивался с составом взвешенных наносов р. Селенги (экспедиционных исследования 2011-2016 гг.) и составом размываемых берегов притоков р. Селенги и притоков (р. Уда). Результаты показали, что более 50 % состава пойменных отложений (разрез пойменного уступа глубиной 1 м от поверхности), соответствуют составу размываемых берегов притоков, а около 30-40 % - составу взвешенных наносов высоких паводков, при которых происходит затопление поймы. Отмечается высокое сходство между обеими доминирующими источниками (состав взвеси паводков и размываемых берегов). Таким образом, в период прохождения повышенного стока состав взвешенных наносов определяется преимущественно поступлением материала от размываемых берегов; при выходе воды на пойму этот же материал активно переотлагается, определяя состав пойменных отложений. Это свидетельствует о том, что наиболее сильно влияние русловых деформаций на химический сток проявляется в период паводков.

Особый тип взаимосвязей между режимом русловых процессов и геохимией речных вод связан с аккумуляцией наносов в пойменно-русловом комплексе и их последующим размывом и повторным вовлечением в транспорт. Интервал времени между аккумуляцией и взмывом может

достигать десятков и сотен лет. Геохимический аспект этой проблемы связан с вторичным загрязнением, когда в результате размыва аккумулятивных толщ в реки поступают объемы ранее «захороненных» загрязняющих веществ - эффект, получивший метафорическое название «геохимические бомбы» (geochemical time bombs). Нахождение поллютантов в аллювии может быть связано как с фоновой геохимической обстановкой, так и с особенностями техногенного загрязнения. Примером фоновых процессов служит обширная аккумуляция наносов в нижнем течении рек Восточной Азии в 12-6 в до н.э., происходившая в условиях колебаний уровня океана и активизации денудационных процессов в Гималаях [10]. Это привело к формированию линз мышьяк-содержащих отложений по периферии палеорусел рр. Ганг, Ямуна и Сурма-Мегхна. Русловое (флювиальное) происхождение этих отложений мышьяка подтверждает преимущественное содержание мышьяка в адсорбированном виде на гидрооксидах железа, распространенных в кварцевых, глинистых и слюдяных минералах, доминирующих в составе речных наносов Ганга и притоков. На современном этапе эволюции долины в результате растворения гидрооксидов железа, сопровождающегося окислением органического вещества, происходит поступление мышьяка и железа в подземные воды, являющиеся основным источником водоснабжения в густонаселенном регионе.

Примеры накопления загрязняющих веществ на пойме и их вторичного вовлечения в транспорт в результате антропогенного воздействия описаны для разных рек мира. Русловые процессы становились ведущим фактором распространения тяжелых металлов после прекращения ведения горнодобывающей деятельности, часто на протяжении сотен лет. В условиях продолжительной горнодобывающей деятельности, сопровождающейся поступлением поллютантов в русловую систему, аккумуляция загрязняющих веществ на пойме имеет сложный характер. На примере р. Гвадиамар (Испания) было показано [18]), что наиболее типичные загрязнители распределены неравномерно по глубине пойменных отложений. Пики отражают условия затопления поймы при прохождении высоких паводков, а также катастрофические сбросы загрязняющих веществ с территории разработок, связанные, в частности, с прорывами дамб хвостохранилищ.

Дифференциация состава речных наносов

В результате развития эрозионных процессов на водосборе и русле формируются наносы разного механического состава. Крупность частиц является интегральным фактором их гидродинамической (по условиям переноса) и химической дифференциации. Разной крупности (весу) соответствуют разные условия переноса и разный химический состав частиц. Наиболее контрастная химическая дифференциация наблюдается между взвешенными и влекомыми (придонными) наносами. При этом соотношение доли взвешенных и влекомых наносов – важнейшая форма проявления русловых процессов, которые, таким образом, отвечают и за особенности химического состава переносимых частиц. Увеличение доли влекомых наносов в об-

шем случае означает усиление доли переносимых минеральных частиц. При этом более мелкие глинистые минералы (каолин, гидрослюды, монтмориллонит, цеолиты и др.), способные к расщеплению на мельчайшие чешуйки, с большей вероятностью оказываются в составе взвешенных наносов. Первичные минералы обычно имеют размер до 0.1 мм, диаметр отдельных зерен кварца, полевых шпатов и некоторых других минералов может превышать величины 1 мм. Размеры частиц различных слюдястых минералов (серицита, гидрослюда и др.) обычно соответствуют размеру частиц менее 0.01 мм. Во фракции менее 0,001 мм из первичных минералов распространен только химически устойчивый кварц, при этом доминируют вторичные глинистые минералы. Тяжелые металлы в основном приурочены к фракциям 0.016 мм, при этом более 50 % содержится только в илистых фракциях 0.008 мм.

Более активному скоростному режиму (увеличению скоростей потока) соответствует вовлечение во взвешенное состояние более крупных частиц и, следовательно, изменение химического состава взвеси в сторону преобладания минеральных фракций. Указанные соотношения количественно характеризуются на основе гидродинамических критериев типа числа Роуза:

$$Ro = \frac{w}{\beta k V_*} \quad (5)$$

где коэффициенты в знаменателе обычно принимаются равными $\beta=1$, $k=0.4$

$$(Ro = 2.5 \frac{w}{V_*}), \quad (6)$$

Отношение касательной скорости потока к гидравлической крупности V^*/w характеризует долю частиц, перемещаемых в придонном слое (влекомые наносы) относительно перемещаемых в толще воды (взвешенные наносы). Критерием массообмена служит $V^* > w$. Обобщение данных по рекам разных природных зон [16]) и лабораторным экспериментам [12] позволяют выделить зоны с преобладанием взвешенных ($V^*/w > 2$ и влекомых наносов ($V^*/w < 2$). При значениях $0.5 < V^*/w < 2$ отдельные составляющие составляют не менее 20 % от общего стока наносов (смешанный тип транспорта).

Учитывая зависимость типа транспорта наносов от величины V^*/w , а химического состава – от w (т.к. $w=f(d)$), можно оценить химический состав наносов разных типов транспорта при разных гидродинамических обстановках V^* . При $V^* = 0.1$ м/с, т.е. равнинным рекам, граничные значения V^*/w в составе взвешенных наносов переносятся фракции менее 1 мм. Из их состава почти полностью исключены первичные минералы, возрастает роль глинистых минералов и тяжелых металлов. Минеральные фракции (петрогенные элементы) преобладают во влекомых наносах или осаждаются на дне. Горному типу руслового процесса (V^*/w) соответствует вовлечение во взвешенное состояние первичных минералов, крупнообломочный материал может перемещаться в составе влекомых наносов. Таким образом, разному проявлению русловых процессов (разным значениям V^*) соответствует раз-

ное распределение вещества между типами транспорта - распределение химических элементов в разном диапазоне крупности (рис. 1).

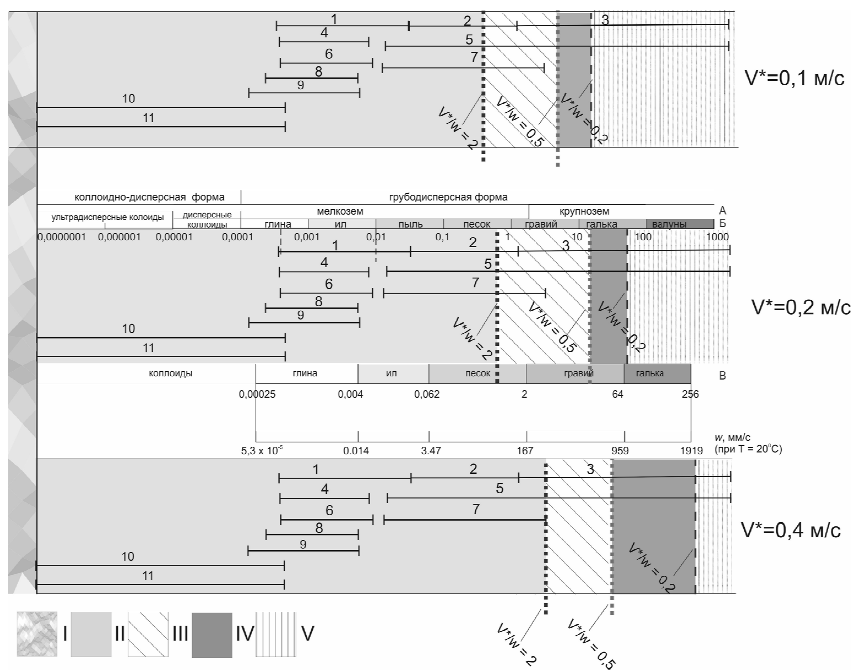


Рисунок 1. Шкала геохимической дифференциации состава речных наносов между формами транспорта вещества – растворенными формами (I) и взвешенными (II), смешанными (III) и влекомыми (IV) наносами и донными отложениями (V) при разных гидродинамических обстановках (касательная скорость V^*)

Типы химических соединений: 1 – глинистые минералы; 2 – первичные минералы; 3 – обломки горных пород; 4 – слюдяные минералы; 5 – роговые обманки, кварц, полевой шпат; 6 – тяжелые металлы; 7 – продукты разложения водных организмов; почвенные агрегаты; 8 – биогены; 9 – радионуклиды; 10 – бактерии; 11 – вирусы; минеральные и органо-минеральные частицы; недиссоциированные и нерастворимые формы гумуса

Классификации механического состава: А – Международная шкала почв (1926); Б – Караушев, 1977; В – Friedman, Sanders, 1978;

Одновременно с распределением между придонными (влекомыми) и взвешенными наносами формируются градиенты химического состава по глубине речных потоков – русловая геохимическая вертикаль. Дифференциация элементов по глубине характеризуют коэффициенты вертикального

распределения $K_x = X_{\text{дно}}/X_{\text{пов}}$, где x – исследуемый параметр (физическая или химическая характеристика потока и состава наносов), дно – его значение в придонном слое (осредненное по придонным горизонтам для всей выборки), пов – значение в приповерхностном слое вертикали. В зависимости от состава наносов и особенностей развития вертикальных деформаций значения K_x меняются. Для проведения анализа были обобщены эмпирические данные о величинах K_x по длине р. Селенга, а также р. Хуанхэ и р. Янцзы) [15].

По длине р. Селенги неоднородность состава взвеси меняется при переходе от галечно-валунного русла р. Селенги к песчано-илистым руслам дельтовых протоков, достоверно увеличиваясь в последнем случае. Учитывая, что гидродинамическая структура потока остается сопоставимой (снижение скоростей от поверхности ко дну характеризуется коэффициентом $K_v = 0,94$ выше дельты и $K_v = 0,96$ в дельте), ведущим фактором формирования структуры переноса тяжелых металлов в составе взвеси следует считать особенности массообмена между русловым потоком и донным отложениями. В среднем в дельте увеличение концентраций тяжелых металлов во взвеси ко дну на 30-40 % выше в песчано-илистых протоках дельты, чем в галечном русле Селенги. При этом градиент увеличения мутности воды в дельтовых протоках увеличивается еще более значительно ($K_s = 1,8$ против $K_s = 1,07$). Эти градиенты могут быть связаны как с большим концентрированием тонкодисперсных глинисто-илистых фракций на дне пойменных протоков, так и распределением в потоке более тяжелых минералов. Роль последнего фактора подтверждает усиление доли песчаных фракций (>0.050 мм) в составе придонных горизонтов дельтовых рукавов, связанное с их осаждением и активным концентрированием.

В среднем в Селенге мутность воды характеризуется вертикальной изменчивостью $K_s = 1,12$ и находится в пределах диапазона изменения микроэлементов, которые формируют следующую последовательность по степени увеличения величины K_x в пределах русловых вертикалей: Pb-Zn-As-Mn-Mo-Cr-Ni-Cu-Cd. Соответственно величина K_x меняется от $K_{\text{Pb}} = 1,04$ до $K_{\text{Cd}} = 1,42$. В условиях почти полного отсутствия фракций песка (менее 2 мм) в потоке (р. Янцзы) формируются самые низкие коэффициенты вертикального распределения K_x , соответствующие прямой стратификации концентраций ($K_x < 1$), причем для отдельных элементов (Pb-Zn) коэффициенты K_{Pb} и K_{Zn} достигают 0,5, т.е. их концентрация в придонном слое уменьшается почти в 2 раза. Характерно, что эти же элементы имеют минимальные значения вертикального распределения и при прямой стратификации в других реках ($K_{\text{Pb}} = 1,04$ и $K_{\text{Zn}} = 1,08$). Подобные соотношения связаны с отсутствием роли минеральных фракций в формировании вертикальных градиентов и, следовательно, «обеднением» придонных слоев по распространению микроэлементов.

Наконец, особые системы распределения встречаются на реках при преобладании песчаных фракций в составе наносов. Обобщение данных по р. Хуанхэ (г.п. Лицзин) [15], отобранные в августе 2001 года, соответ-

ствовали значительной доли песчаных фракций на всех горизонтах руслового потока (0.05-2 мм = 30,97%). В этих условиях коэффициенты вертикального распределения K_x характеризуются обратной стратификации ($K_x < 1$), однако близки к 1. Наиболее вероятное объяснение подобным распределениям связано с господствующей ролью минеральных соединений в формировании потока микроэлементов. При этом столь высокое встречаемость тяжелых минеральных частиц в составе взвешенных наносов характерно для условий высокой транспортирующей способностью потока, при которой наблюдается наиболее высокое перемешивание потока и исчезновение вертикальных градиентов. Таким образом, выделяются типовые группы рек, отличающиеся по распределению химических веществ по глубине (структуре русловых геохимических вертикалей): с песчаным составом взвешенных наносов; со смешанным составом взвешенных наносов; и глинисто-илистым составом.

1. Алексеевский Н.И., Белозёрова Е.В., Касимов Н.С., Чалов С.Р. Пространственная изменчивость характеристик стока взвешенных наносов в бассейне Селенги в период дождевых паводков // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5. География. № 3, 2013. С.60-65.
2. Асарин А.Е, Бестужева К.Н., Христофоров А.В., Чалов С.Р. Водохозяйственные расчеты. М.: Географ. ф-т, 2012. 140 с.
3. Гордеев В.В. Система река – море и ее роль в геохимии океана М.: ИП Матушкина И.И., 2009. 452 с.
4. Касимов Н.С., Кошелева Н.Е., Лычагин М.Ю, Чалов Р.С. и др. Эколого-географический атлас-монография Селенга-Байкал. М.: Географ. ф-т МГУ, 2018. 288 с.
5. Магрицкий Д.В. Годовой сток взвешенных наносов российских рек водосбора Северного Ледовитого океана и его антропогенные изменения // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5 География, 2010. № 6. С. 17–24.
6. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Центр «Интеграция», 1999. 768 с.
7. Савенко В.С. Химический состав взвешенных наносов рек мира. М.: ГЕОС, 2006. 175 с.
8. Страхов Н.М. Основы теории литогенеза. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 212 с.
9. Эрозионно-русловые системы М.: ИНФРА-М, 2017. 702 с
10. Acharyya S.K., Shah B.A. Arsenic-contaminated groundwater from parts of Damodar fan-delta and west of Bhagirathi River, West Bengal, India: Influence of fluvial geomorphology and Quaternary morphostratigraphy // Environ. Geol. 2007. Vol. 52. № 3. P. 489–501.
11. Borrelli P. et al. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion // Nat. Commun. 2017. Vol. 8. № 1. P. 2013.
12. Guy H.P., Simons D.B., Richardson E.V. Summary of Alluvial Channel Data From Flume Experiments , 1956-61 // U.S. Geol. Surv. 1966. P. 1–104.

13. *Julien P.Y.* Erosion and sedimentation. Cambridge University Press. 2010. 391 p.
14. *Milliman J.D., Farnsworth K.L.* River Discharge to the Coastal Ocean: A Global Synthesis // Cambridge Univ. Press. 2013. T. 24. № 4. C. 143–160.
15. *Qiao S. et al.* Metals in suspended sediments from the Changjiang (Yangtze River) and Huanghe (Yellow River) to the sea, and their comparison // Estuar. Coast. Shelf Sci. 2007. Vol. 74. № 3. P. 539–548.
16. *Shen H.W., Julien P.Y.* Erosion and Sediment Transport // Handbook of Hydrology, 1993.
17. *Syvitski J.P.M. et al.* Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean // Science (80). 2005. Vol. 308. № 5720. P. 376–380.
18. *Turner J.N., Brewer P.A., Macklin M.G.* Fluvial-controlled metal and As mobilisation, dispersal and storage in the Río Guadamar, SW Spain and its implications for long-term contaminant fluxes to the Doñana wetlands // Sci. Total Environ. 2008.
19. *Viers J., Dupré B., Gaillardet J.* Chemical composition of suspended sediments in World Rivers: New insights from a new database // Sci. Total Environ. 2009. Vol. 407. № 2. C. 853–868.
20. *Vörösmarty C.J. et al.* Anthropogenic sediment retention: Major global impact from registered river impoundments // Glob. Planet. Change. 2003. Vol. 39. № 1–2. P. 169–190.
21. *Walling D.E., Collins A.L.* Suspended sediment sources in British rivers // Sediment Budgets 1 IAHS Publ. 2005. Vol. 291. № April. P. 123–133.
22. *Zinger J.A., Rhoads B.L., Best J.L.* Extreme sediment pulses generated by bend cutoffs along a large meandering river // Nat. Geosci. 2011.