

РУСЛОВАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ СТОКА НАНОСОВ: ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ НА КРУПНЫХ РЕКАХ РОССИИ

С.Р. Чалов¹, А.С. Завадский², П.П. Головлев³, В.А. Иванов⁴

¹⁻⁴ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева*

¹ *Доц., д-р геогр. наук; e-mail: srchalov@geogr.msu.ru*

² *Вед. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: az200611@rambler.ru*

³ *Мл. науч. сотр.; e-mail: pavel_golovlev@list.ru*

⁴ *Техник; e-mail: viktoro.1998@yandex.ru*

Эрозия берегов и дна рек формирует значительную часть материкового стока наносов – его русловую составляющую. В статье дается количественная оценка поступления наносов руслового происхождения 14 000 км нижнего течения Оби, Енисея, Лены, Камчатки и русловой сети Селенги. Абсолютные объемы поступления наносов за счет размывов берегов максимальны на нижней и средней Лене (до 38,7 млн т год⁻¹ на 100 км русла). Они меньше на нижней и средней Оби (до 19,9 млн т год⁻¹ на 100 км русла), и снижаются до 2 млн т год⁻¹ за счет ограниченных условий развития русловых деформаций – на Енисее, а за счет меньшего размера рек – на Селенге и Камчатке. На Енисее объем поступления наносов руслового происхождения в два раза ниже, чем сток наносов, а на других реках – выше до 9 раз. Максимальные темпы размывов берегов характерны для широкопойменных меандрирующих и разветвленных русел; на участках разветвленного русла основную часть в структуре размывов занимают деформации островов. Результаты свидетельствуют о важной роли русловой составляющей в формировании стока наносов крупнейших рек.

Ключевые слова: эрозия берегов, баланс наносов, сток наносов, Лена, Енисей, Обь, Селенга, Камчатка

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.5.11

ВВЕДЕНИЕ

В пределах равнинных областей формируются эрозионно-русловые системы аккумулятивного типа, в которых происходит задержка большей части поступающего с водосбора материала [Burt, Allison, 2009], объем которого в два и более раз превосходит сток наносов [Сидорчук, 2015]. С увеличением размера речных бассейнов роль русловых источников наносов возрастает [Church, Slaymaker, 1989; Walling, 1993], однако количественные оценки этого явления до сих пор остаются открытым вопросом в русловедении [Bracken, 2010]. Это объясняется малой эмпирической изученностью влияния русловых деформаций на сток наносов в отличие от бассейновой составляющей, изучению которой посвящена обширная литература [Дедков, Мозжерин, 1984; Ferro, Minacapilli, 1995].

В общем случае вклад русловых процессов в изменение стока наносов может быть рассмотрен на основе генетической концепции формирования стока наносов [Алексеевский, 1998]. Транспорт наносов W в замыкающем створе речного бассейна связан с поступлением материала от i -частных источников, расположенных на водосборе $\sum A_i$ и в русле $\sum C_i$. В таком случае величина $\sum C_i$:

$$\sum C_i = a_{\text{рг}} + a_{\text{рв}} - a_{\text{ар}} - a_{\text{ап}}, \quad (1)$$

где $a_{\text{рг}}$ – горизонтальные деформации (% от W_n), $a_{\text{рв}}$ – вертикальные деформации, $a_{\text{ар}}$ – аккумуляция наносов на пойме, $a_{\text{ап}}$ – аккумуляция наносов в русле. Для определения величины $a_{\text{рг}}$ часто используются допущения, в частности об отнесении всех фракций с диаметром более 0,05 мм к наносам руслового генезиса. Получаемые результаты обладают большой неопределенностью и изменяются в широких пределах. Например, для стока взвешенных наносов, по данным Н.И. Алексеевского, – от 1 до 64%. Наиболее известные исследования, основанные на разделении источников формирования стока наносов, связаны с работами А.П. Дедкова и А.В. Гусарова, согласно которым величина русловой составляющей в среднем не превышает 15% [Гусаров, 2015]. Недостатком этих работ является отсутствие верификации используемой расчетной модели, основанной на значительных допущениях (построение зависимости между расходом воды и расходом русловых наносов по 2–3 точкам, соответствующим меженям, когда предполагается отсутствие бассейновых фракций в стоке наносов). Широкое применение получили косвенные методы статистического выявления соответствия грунтов

в источниках поступления материала и в речном потоке. Модель «отпечатка пальцев» (fingerprinting) позволила выполнить обобщение расчленения стока наносов рек Великобритании [Walling, Collins, 2005].

Прямые определения вклада русловых деформаций в сток наносов в масштабах крупных речных бассейнов ранее не проводились из-за ограниченности ретроспективных данных в достаточном для выявления пространственных закономерностей количестве. В результате соотношение разных составляющих уравнения (1) для масштаба крупного речного бассейна в литературе неизвестно. В то же время современные геоинформационные базы данных и архивы спутниковых снимков позволяют значительно расширить возможности анализа. Целью статьи является оценка темпов размывов берегов, рассматриваемых как основной механизм формирования русловой составляющей стока наносов таких крупных рек, как Обь, Енисей, Лена, Селенга и Камчатка. Решались задачи разработки методики ГИС-моделирования динамики берегов и островов, на основе которой проводился анализ отличий проявления размыва берегов как важнейшей компоненты русловой составляющей стока наносов в разных речных бассейнах и на отдельных участках рек и выполнялось определение соотношения объемов русловых деформаций и стока наносов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе выбраны несколько участков нижнего течения крупных рек. Для Оби нижней границей исследуемого участка выбран створ впадения Оби в Обскую губу. Для Енисея и Лены оценки даны для участка выше дельтовых областей. На Селенге рассматривался сегмент русловой сети выше дельты р. Селенги. На р. Камчатке нижней границей был выбран участок подхода реки к хребту Кумроч (рис. 1), где происходит резкое сужение долины, смена широкопойменного разветвленного русла на врезанное прямолинейное. Ниже по течению располагается устьевая область реки.

Исследуемые реки относятся к крупным полизональным бассейнам, охватывающим значительные широкопойменные участки речных долин. Рассматриваемые участки Оби, Селенги и Камчатки формируются исключительно в свободных условиях развития русловых деформаций (ширина поймы значительно превышает ширину русла). На Лене доля участков рек с ограниченными условиями развития русловых деформаций возрастает, а на Енисее они доминируют по длине реки (табл. 1). Среди исследуемых рек только Енисей на всем протяжении имеет галечно-валунное русло.

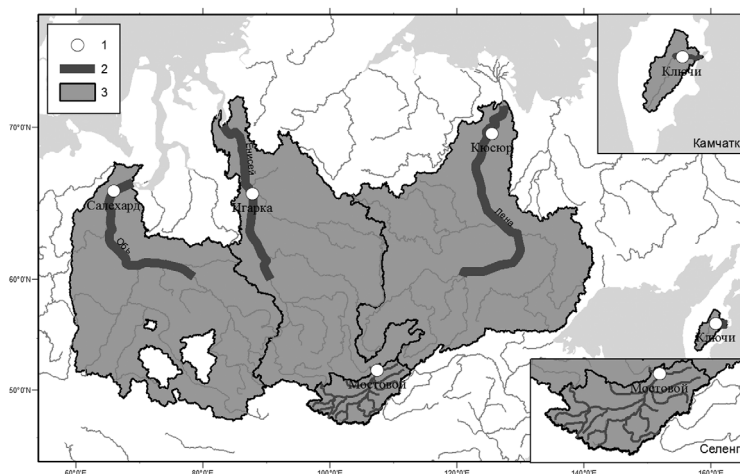


Рис. 1. Исследуемые участки крупных рек России:

1 – устьевые гидрологические посты; 2 – участки расчета русловых деформаций; 3 – водосборы изучаемых рек

Fig. 1. Studied sections of the large rivers of Russia: 1 – downstream gauging stations; 2 – areas of bank erosion calculation; 3 – catchments of the studied rivers

Оценка темпов русловых деформаций зависит от степени детализации данных и пространственного охвата исследований. Первый метод предполагал использование глобальной базы данных Global Surface Water Explorer (GSWE) [Pekel et al., 2016], которая содержит сведения об изме-

нении площадей водных объектов в период с 1984 по 2021 г. и позволяет в автоматическом режиме дешифровать размывы берегов. Информация об изменении контуров русла характеризовалась набором данных Occurrence Change Intensity (OCI) – интенсивность изменения положений во-

дной поверхности за разные периоды времени. Методика была подвергнута проверке на примере размывов нижней и средней Оби [Иванов, Чалов, 2021], где расчетные площади размывов по GSWE были сопоставлены с аналогичными данными ручной обработки снимков [Куракова, Чалов, 2019]. Величина погрешности определения

параметров размыва берегов в среднем составляет 11%, что позволяет использовать набор данных GSWE. Период применения лимитируется 1984 г. (архив снимков Landsat 5). На этой основе выполнен анализ 1300 км нижнего течения Оби, 1200 км нижнего течения Енисея, 1700 км нижнего течения Лены (см. рис. 1).

Таблица 1

Сравнительный анализ геолого-геоморфологических условий формирования русловой составляющей исследуемых рек (% от длины рек)

Река	Ограниченные условия			Неограниченные (широкопойменные) русла		
	Относительно прямолинейное	Меандрирующее	Разветвленное	Относительно прямолинейное	Меандрирующее	Разветвленное
Обь	–	–	–	35	45	20
Селенга	–	15	–	–	54	31
Енисей	34	33	17	9	2	5
Лена	18	12	34	15	–	21
Камчатка	–	4	–	–	42	54

Второй метод предполагает анализ многолетней динамики русел рек на возможностях ГИС ArcGIS Desktop «обучаться» самостоятельному дешифрированию осевой линии речных русел в определенном спектре цветовых каналов космических снимков. Это позволило автоматизировать процесс сопоставления разновременных космических изображений и на несколько порядков ускорить получение пространственной информации о темпах и направленности горизонтальных русловых деформаций, протяженности фронта размыва берегов. Подобная методика была реализована по длине рек бассейна Селенги, что позволило рассмотреть 8617 км русла в этом бассейне. Использование этой методики предполагало введение утоняющего коэффициента для участков разветвленного русла. С учетом того, что доля разветвленного и разветвленно-извилистого русла (формирующегося в широкопойменных условиях) в бассейне Селенги составляет 15%, полученную величину темпов размыва берегов увеличивали на 10%.

Для 600-километрового участка р. Камчатки оценка русловой эрозии производилась путем сопоставления контуров русла по привязанным снимкам 1964–1975 гг. программы Corona и современным (2012–2018) снимкам Quickbird, Worldview и Spot [Чалов, Чалова, Школьный, 2021].

Реализация каждого из методов позволила разделить с шагом по длине русла от одного (р. Лена и р. Камчатка) до 10 км (остальные исследуемые реки) следующие параметры размыва берегов:

- 1) площадь размыва левого берега $F_{\text{лб}}$;

- 2) площадь размыва правого берега $F_{\text{пб}}$;

- 3) площадь островного размыва $F_{\text{остр}}$;

- 4) суммарную площадь размыва на участке F .

Полученные параметры использованы для оценки скорости размыва берегов в пределах зоны размыва. Для этого площадь размываемого берега $F_{\text{лб}}$ (или $F_{\text{пб}}$) соотносилась с длиной зоны размыва L (см. рис. 1) для определения средней ширины зоны размыва:

$$B_{\text{разм}} = \frac{F}{L}. \quad (2)$$

Разделив получившееся значение на количество лет n между съемками, оценивали скорости отступления берега за период (м/год):

$$C_{\text{разм}} = \frac{B_{\text{разм}}}{n}. \quad (3)$$

Оценка объема грунтов, поступающих в реку в результате размыва берегов, проводилась на основе определения высот берегов (надводной и подводной части). Значения высот берегов Оби, Енисея, Лены и Камчатки определены с использованием цифровой модели рельефа ArcticDEM [Morin et al., 2016] при построении поперечных профилей в створах наибольшего размыва на выделенных участках. Для этого проводилось определение абсолютного значения высоты берегового уступа и вычитание соответствующей данному участку высоты меженного уреза воды. Для рек бассейна Селенги определялся среднемаксимальный расход воды Q , который был принят в качестве руслонаполняющего, соответ-

ствующего, таким образом, бровкам подмываемых берегов и определяющего глубину потока и высоту размываемого берегового уступа. Для оценки расходов воды была использована модель формирования речного стока на водосборе ECOMAG, адаптированная для бассейна Селенги [Moreido, Kalugin, 2017]. Расчеты средней высоты размываемого берега (включая подводную часть уступа) проводились на основе гидравлической схематизации:

$$V = c\sqrt{hI}, \quad (4)$$

$$c = \frac{h^{1/6}}{n}, \quad (5)$$

$$Q = wV, \quad (6)$$

$$w = hB. \quad (7)$$

Исходя из этих выкладок:

$$Q = \frac{h^{5/3}B\sqrt{I}}{n}. \quad (8)$$

Отсюда

$$h^{5/3} = \frac{Qn}{B\sqrt{I}}, \quad (9)$$

или

$$h = \left(\frac{Qn}{B\sqrt{I}} \right)^{3/5}. \quad (10)$$

Коэффициент шероховатости n в этих формулах был принят исходя из морфодинамического типа русла: 0,035 – врезанное (прямолинейное, извилистое); 0,030 – адаптированное широкопойменное прямолинейное русло; 0,027 – адаптированное извилистое разветвленное русло; 0,025 – широкопойменное разветвленное извилистое русло; 0,022 – широкопойменное разветвленно-извилистое многорукавное русло. Средняя ширина русла (основного рукава) B определялась путем осреднения в пределах бесприоточных участков и в пределах одного типа русла. Для получения информации об уклонах дна речных долин в пределах рассматриваемых участков использовалась ЦМР HydroSHEDS, базирующаяся на радарной съемке SRTM [Danielson, Gesch, 2011], показавшей наиболее корректное определение положения гидрографической сети в рельефе.

Объем поступающего в водный поток материала ($W_{\text{русл}}$) в результате плановых русловых деформаций за многолетний период для каждого 10-километрового участка (в м³/год) составляет

$$W_{\text{русл}} = hLC_{\text{разм}}. \quad (11)$$

Для пересчета в единицы массы грунта использовалась средняя плотность размываемых грунтов 1,7 т/м³ [Караушев, 1969].

Это позволило создать базу данных объемов поступления материала в русла рек за счет размыва берегов для периода с 1970-х гг. по настоящее время. Общая протяженность изученной русловой сети – более 14 000 км по длине Оби, Енисея, Лены, Камчатки и рек бассейна Селенги. Полученные результаты сопоставлялись с данными о стоке наносов исследуемых рек, приведенных в работах [Chalov и др., 2018; Chalov и др., 2019; Магрицкий, 2010].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По длине всех рек получены оценки высот берегов, уклонов русла, параметров размыва $c_{\text{разм}}$, F и величины русловой составляющей стока наносов $W_{\text{русл}}$. Средняя высота берегов над меженным уровнем для исследуемых участков Лены составила 7,5 м, Оби – 4,3 м и Енисея – 9,8 м. Средняя скорость размыва берегов $c_{\text{разм}}$ для рек Обь, Енисей и Лены оценивается в 0,8, 0,82 и 4,51 м/год соответственно, на Камчатке она составляет 2 м/год. Максимальная скорость размыва для рек Обь, Енисей и Лены достигает отметок 4,0, 12,6, 10,5 м/год соответственно.

Суммарный объем поступления продуктов русловой эрозии на участке 1680 км нижней Оби оценен величиной 151 млн т·год⁻¹, на 1500-километровом участке Енисея – 15,9 млн т·год⁻¹, а на 1800-километровом участке Лены – 338 млн т·год⁻¹ (рис. 2). На реке Камчатке общая площадь размываемых участков за период сопоставления (от 23 до 50 лет в зависимости от наличия снимков на участки реки) составила 23,5 км², что соответствует средней величине 670 000 м²/год. В результате размыва берегов в русло р. Камчатки поступает около 4,6 млн т·год⁻¹ (табл. 2). В отдельные годы эта величина может увеличиваться в результате прорыва излучин.

В бассейне Селенги для основной части русловой сети (табл. 3) объем наносов, поступающих в русла рек, определен величиной 26,7 млн т·год⁻¹, что на порядок меньше, чем объем наносов, поступающих в результате размыва берегов только в нижнем течении (около 1800 км) русла Лены и Оби (без притоков) (см. табл. 2). При этом 1000 км нижнего течения основного русла Селенги определяет больше половины этого объема (15,1 млн т·год⁻¹). Максимальные для всего бассейна средние скорости размыва берегов (2,8 м/год) и самые протяженные фронты размыва берега (30%) отмечены для главного русла, при этом размыву подвержена значительная часть береговой линии. Здесь формируются протяженные эрозионные участки берега, отступающие со скоростями 3–5 м/год. Высокие темпы горизонтальных русловых деформаций (1–3 м/год), зафиксированы на отдельных участках верхнего

и нижнего течения Чикоя, на левобережных притоках Селенги (Мурен, Эгейн-гол, Джиды), в верхнем течении Орхона. Однако в свободных условиях развития русловых деформаций скорости размыва берегов не превышают 1 м/год, а в большинстве случаев – до 0,5 м/год. Здесь размываемые берега приурочены в основном к вогнутым берегам излучин, а при недостаточной удельной мощности потока – к ее отдельным элементам. Объем поступления наносов руслового происхождения снижается по мере уменьшения размера рек.

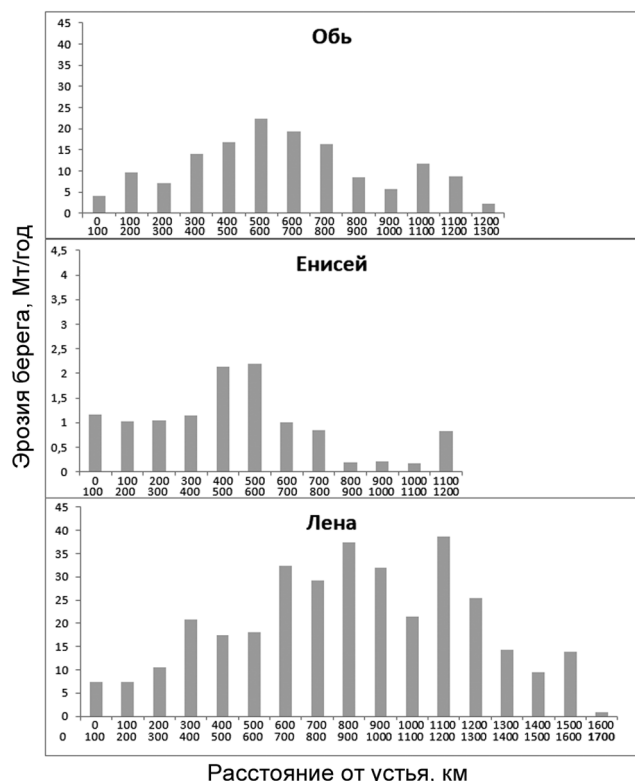


Рис. 2. Изменение площади размыва по длине участков Лены, Енисея, Оби

Fig 2. Changes in the areas of bank erosion along the length of the Lena, Yenisei and Ob rivers

Наибольшее влияние русловой эрозии на сток наносов оказывают участки разветвленного русла. В бассейне Селенги максимальные размывы (в среднем в вершинах излучин от 9 до 16 м/год) характерны для участка реки широкопойменного разветвленно-меандрирующего русла (табл. 3). При этом на участках широкопойменного разветвленного русла больше половины от всей площади русловой эрозии занимает размыв островов. На участке р. Лены от Покровска до Жиганска из общего объема поступающего в русла материала за счет размыва берегов 60% (11 тыс. м²·год⁻¹·км⁻¹) относится к островной эрозии и 40% – к береговой эрозии, причем левый и правый берег в равном соотноше-

нии – по 20% (3,7 тыс. м²·год⁻¹·км⁻¹). Максимальные интенсивности размыва приурочены к сужениям ширины русла и перекатным участкам. На всех реках соотношения интенсивности размывов правого и левого берега примерно одинаковые. Например, на реке Камчатке протяженность берега, подверженного размыву, составляет 37% длины левого и 44% длины правого.

Таблица 2

Оценки поступления продуктов русловой эрозии в сток наносов для некоторых рек РФ ($W_{\text{русл}}$, млн т·год⁻¹) на период с 1970-х гг. по настоящее время

Расстояние от устья, км	Обь	Енисей	Лена	Селенга	Камчатка
0–100	3,1	*	*	1,9	0,08**
100–200	3,2	1,2	0,9	1,15	0,77
200–300	8,9	1,0	13,9	1,9	1,18
300–400	6,2	1,0	9,4	1,9	1,49
400–500	6,9	1,2	14,3	1,1	0,5
500–600	11,8	2,1	25,4	0,3	0,5
600–700	11,8	2,2	38,7	0,7	0,17
700–800	19,9	1,0	21,5	≈6	–
800–900	15,3	0,9	32,8		–
900–1000	9,2	0,2	37,5		–
1000–1100	15,4	0,2	29,2	–	–
1100–1200	2,4	0,2	32,4	–	–
1200–1300	7,2	0,8	18,1	–	–
1300–1400	4,5	3,9	17,5		
1400–1500	7,0		20,8		
1500–1600	6,6		10,5		
1700–1800	5,5		7,3		
<i>Итого</i>	<i>144,9</i>	<i>15,9</i>	<i>338</i>	<i>15,1 (28,6)***</i>	<i>4,6</i>
Сток наносов $W_R + W_G$, млн т·год ⁻¹					
	58,2	32,5	38,6	2,5	2,5

Примечание. * Для Енисея и Лены оценки даны для участка выше дельты.

** Оценка дана для 30-километрового участка – отметки от 70 до 100 км от устья (выше урочища Большие Щеки).

*** В скобках дано значение, полученное при оценке для р. Селенги и ее притоков общей протяженностью 8617 км речной сети.

По длине нижнего течения крупнейших рек отличия в проявлениях русловой эрозии определены геолого-геоморфологическими условиями развития русловых деформаций. Суммарный объем русловой эрозии на Оби (151 млн т·год⁻¹) и Лене (338 млн т·год⁻¹) значительно больше, чем на Енисее (15,9 млн т·год⁻¹). Это объясняется распростра-

нением широкопойменных разветвленных русел на первых двух реках при преобладании врезанного и адаптированного русла на Енисее (см. табл. 1). При этом широкопойменные условия не являются исключительным фактором усиления русловой составляющей стока наносов. В частности, на Лене ограниченные условия развития русловых деформаций выражены значительно сильнее, чем на Оби. Большие объемы поступления наносов руслового происхождения объясняются интенсивными русловыми переформированиями, а также в среднем большей высотой размываемых берегов (7,5 м на Лене по сравнению с 4,3 м на Оби).

Таблица 3

Расчеты объема поступления материала в русловую сеть р. Селенги и притоков в результате размыва берегов (в пределах основного русла или главного рукава)

Река	Суммарный объем	
	м³/год	т/год
Джида	847 198	1 440 200
Дэлгэр-Мурэн	233 282	396 600
Идэр	412 960	702 000
Орхон	1 143 891	1 944 600
Селенга	7 304 712	12 418 000
Тамир	448 632	762 700
Туул	684 115	1 163 000
Уда	454 782	773 100
Хануйин	4 371	7 400
Хара	142 079	241 500
Хилок	509 027	865 300
Чикой	1 577 407	2 681 600
Чулутын	67 734	115 100
Эгийн	396 272	673 700
Эроо	25 834	43 900
<i>Всего по бассейну</i>	<i>14 252 297</i>	<i>24 230 000</i>
<i>С учетом размыва берегов на островах</i>		<i>26 700 000</i>

Другим фактором усиления русловой составляющей стока наносов на Лене можно считать водный режим и условия прохождения руслоформирующих расходов воды. Так, продолжительность руслонаполняющего расхода выше бровок поймы на Лене длится около 40 дней [Gautier et al., 2021; Hasholt et al., 2006], в то время как на Оби и Енисее всего 30 дней [Shiklomanov и др., 2021]. Частично это связано с минимальной антропогенной зарегулированностью стока на Лене. С другой стороны, для водного режима Лены характерны более высокие

и частые летние паводки. Причиной усиления русловой эрозии на Лене можно рассматривать также активизацию термоэрозионных процессов в период повышенного стока [Gautier et al., 2021]. Фактор разрушения многолетнемерзлых пород [Chalov et al., 2021; Magritsky et al., 2018] более существенен для этого бассейна, который на 90% [Strauss et al., 2021] расположен в зоне вечной мерзлоты. Он усиливается также за счет увеличения теплового стока, проявлением которого является рост подрусловых таликов [Rachold et al., 1996].

На реках меньшего размера (Селенга, Камчатка) скорости отступления берегов часто превышают соответствующие значения этого параметра на крупнейших реках, однако за счет меньшей высоты берегов в русла поступают меньшие объемы наносов руслового происхождения. Удельные объемы поступления наносов сопоставимы у Енисея, Селенги и Камчатки (около 1 млн т/год на 100 км русла) при отличии водности этих рек на один порядок величины.

На Селенге и Камчатке возрастает продольная неоднородность интенсивности русловых деформаций по сравнению с крупнейшими реками. В частности, на Камчатке при выходе из горной области происходит массовая аккумуляция поступающего материала и соответствующее ему увеличение неустойчивости русла, что определяет максимальные размывы берегов на этом участке (до 16 м/год), существенно снижающиеся ниже по течению [Чалов, Чалова, Школьный, 2021]. На реках меньшего размера русловая составляющая стока наносов имеет большую неоднородность во времени. На Камчатке прорывы излучин могут существенно увеличивать сток наносов в отдельные годы. Так, после произошедшего в 1993 г. прорыва излучины, приведшего к полному исчезновению покинутого поселка Машура, в русло р. Камчатки единовременно поступило до 1,03 млн т материала, что составляет около 46% годового стока наносов.

В масштабах русловой сети изменчивость русловой составляющей стока наносов определяется морфодинамическими типами русла. Характерной особенностью распределения $W_{\text{русл}}$ является ее максимальный рост на главной реке бассейна, что связано с преобладанием здесь широкопойменного разветвленного русла и большой удельной мощностью потока, способствующих формированию протяженных эрозионных участков берега. В бассейне Селенги среди 15 проанализированных рек общей протяженностью 8617 км участки максимальных средних скоростей размыва берегов (2,8 м/год) и длины фронта размыва берега (30%) отмечены для главной реки. На реках меньшего размера интенсивность русловых переформирований меньше, либо протяженность участков интенсивного размыва

ва на них характерна только для коротких сегментов русла. Даже на крупнейших притоках в свободных условиях развития русловых деформаций скорости размыва берегов не превышают 1 м/год, а в большинстве случаев – до 0,5 м/год. Удельная доля поступления наносов $W_{\text{русл } 0}$ ($\text{т} \cdot \text{год}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$) почти в три раза выше по бассейну в пределах участков широкопойменного разветвленного русла, составляя здесь в среднем $5,5 \text{ т} \cdot \text{год}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$ (рис. 3).

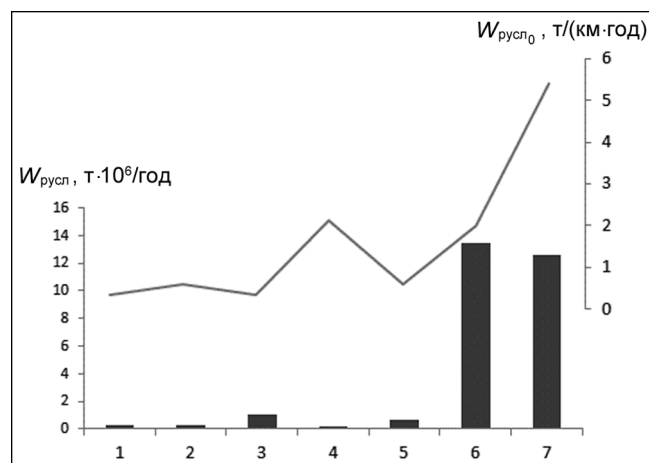


Рис. 3. Изменение интенсивности поступления продуктов русловой эрозии в пределах разных типов русел рек бассейна р. Селенги:

- 1 – горные реки, полугорные и равнинные реки, врезанные;
- 2 – относительные прямолинейные; 3 – меандрирующие;
- 4 – аккумулятивные разветвления, полугорные и равнинные реки, широкопойменные; 5 – относительно прямолинейные;
- 6 – меандрирующие; 7 – разветвленные

Fig. 3. Changes in the intensity of the input of bank erosion material within different types of river channels within the Selenga River basin: 1 – mountain rivers, semi-mountainous and lowland rivers, incised; 2 – relatively rectilinear; 3 – meandering; 4 – accumulative branchings, semi-mountainous and lowland rivers, with wide floodplains; 5 – relatively rectilinear; 6 – meandering; 7 – braided

В контексте балансовых оценок интересным представляется также сравнение объемов поступления материала в сток наносов за счет эрозии берегов и донной эрозии. Считается, что последний фактор максимально выражен в нижнем бьефе водохранилищ [Tena, Batalla, 2013]. Был определен объем донной эрозии в нижнем бьефе Новосибирского водохранилища, где наблюдались наиболее существенные темпы трансгрессивной эрозии среди крупнейших рек Сибири [Magritsky et al., 2018]. Здесь на 26 км нижнего бьефа за 1960–1973 гг. [Ботвинков и др., 2005] наблюдались темпы врезания средней мощностью 1,3 м [Куракова, Чалов, 2019]. При средней ширине русла 1000 м, а также при сред-

ней плотности донных отложений 1700 кг/м^3 , объем донной эрозии, таким образом, можно оценить величиной $4,4 \text{ млн т} \cdot \text{год}^{-1}$. По сравнению с полученными оценками объемов поступления наносов в результате русловой эрозии для участка нижней и средней Оби (см. табл. 2) можно сделать вывод, что размывы берегов играют ведущую роль в формировании русловой составляющей стока наносов, определяя формирование более 95% материала руслового происхождения.

Полученные результаты определения объемов русловой эрозии позволяют сделать выводы о балансе наносов крупных речных бассейнов. В нижнем течении крупнейших рек величина поступления продуктов русловой эрозии сопоставима со стоком наносов (см. табл. 2), а учитывая, что они непосредственно поступают в русла реки, можно предполагать крайне высокие значения генетических коэффициентов русловой эрозии $a_{\text{рг}}$. Русловая составляющая стока наносов подчиняется широтной зональности и подвержена масштабным эффектам (зависит от размера рек). По длине средней (ниже слияния с р. Вах) и нижней Оби, а также нижнего Иртыша (ниже Горноправдинска) в результате русловых деформаций в русло поступает $33,5 \text{ млн т} \cdot \text{год}^{-1}$, что меньше стока наносов в замыкающем створе. Объемы наносов, поступающих в русла рек в результате русловой эрозии в пределах речных бассейнов южных рек, где широко распространены слабоустойчивые и неустойчивые русла, могут значительно превышать сток наносов рек (в бассейне Селенги – в 11 раз) (см. табл. 3). Высоких значений редукция стока наносов руслового происхождения достигает в предгорных регионах, отличающихся экстремальной степенью русловых переформирований. В бассейне Камчатки только по длине главной реки объем продуктов русловой эрозии в два раза превышает сток наносов в замыкающем створе, т. е. не менее половины материала, поступающего за счет размыва берегов, аккумулируется в русле.

ВЫВОДЫ

Обширная база пространственных данных, созданная методами полу-автоматизированной обработки космических снимков позволила выполнить анализ пространственных закономерностей важнейшего проявления русловых деформаций – размывов берегов. Дана оценка основных закономерностей формирования русловой составляющей стока наносов Оби, Енисея, Лены, Селенги и Камчатки:

1. Суммарный объем поступления продуктов русловой эрозии на участке 1680 км нижней Оби составляет $151 \text{ млн т} \cdot \text{год}^{-1}$, на 1500-километровом участке Енисея – $15,9 \text{ млн т} \cdot \text{год}^{-1}$, на 1800-километровом участке Лены – $338 \text{ млн т} \cdot \text{год}^{-1}$, а в нижнем течении р. Камчатки (700 км) – $4,6 \text{ млн т} \cdot \text{год}^{-1}$. Горизон-

тальные деформации по длине 15 крупнейших рек бассейна Селенги общей протяженностью 8617 км определяют поступление 26,7 млн т·год⁻¹ наносов руслового происхождения. Отличия в проявлениях русловой эрозии определены геолого-геоморфологическими условиями и размерами рек, важную роль играют условия прохождения руслоформирующих расходов и распространение вечной мерзлоты.

2. Интегральным фактором формирования русловой составляющей стока наносов являются морфодинамические типы русла. Отмеч увеличение роли русловой составляющей стока наносов на главной реке бассейна, что связано с преобладанием здесь широкопойменного разветвленного русла и большой удельной мощностью потока, которые способствуют формированию протяженных размываем участков берега. Размывы берегов широкопойменных рек значительно превышают темпы вертикальных деформаций даже на участках направленного врезания (нижние бьефы). На участках разветвленного русла важнейшую роль в фор-

мировании русловой составляющей стока наносов играют размывы островов (более 50%).

3. В нижнем течении крупных рек возрастают относительные (относительно замыкающего потока наносов) значения вклада поступления наносов в результате размыва берегов. В ограниченных условиях развития русловых деформаций объем поступления наносов руслового происхождения в два раза меньше стока наносов в два раза для Енисея. На широкопойменных реках кратность превышения объемов русловой эрозии над стоком наносов варьирует от 2–3 раз (Камчатка и Обь) до 6–8 (Лена и Селенга) и до более 10 при учете вклада размыва берегов на крупнейших притоках.

Полученные оценки увеличивают изученность вопроса соотношения русловой и бассейновой составляющих в стоке наносов. Они полезны при прогнозировании русловых переформирований, а также для оценки экологических и социально-экономических последствий проявлений русловых процессов.

Благодарности. Оценки по бассейну Лены выполнены при финансовой поддержке РНФ, проект 21-17-00181. Обобщение данных – по госзаданию № 121051100166-4 научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Макавеева МГУ имени М.В. Ломоносова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеевский Н.И. Формирование и движение речных наносов. М.: Изд-во МГУ, 1998. 202 с.
- Ботвинков В.М., Рулева С.Н., Седых В.Л., Чалов Р.С. Гидроэкологические проблемы русла р. Оби в нижнем бьефе Новосибирской ГЭС // Эрозионные и русловые процессы. 2005. Т. 4. С. 90–103.
- 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.
- Дедков А.П., Мозжерин В.И. Эрозия и сток наносов на Земле. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1984. 264 с.
- Иванов В.А., Чалов С.Р. Оценка баланса наносов рек Обь и Енисей // Геоморфология. 2021. Т. 3. С. 79–89.
- Караушев А.В. Речная гидравлика. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 415 с.
- Куракова А.А., Чалов Р.С. Размывы берегов на широтном участке средней Оби и их связь с морфологией русла // Географический вестник. 2019. № 3(50). С. 34–47.
- Магницкий Д.В. Годовой сток взвешенных наносов российских рек водосбора Северного Ледовитого океана и его антропогенные изменения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2010. № 6. С. 17–24.
- Сидорчук А.Ю. Баланс наносов в эрозионно-русловых системах // Геоморфология. 2015. Т. 1. С. 14–21.
- Чалов С.Р., Чалова А.С., Школьный Д.И. Количественная оценка плановых переформирований реки Камчатки // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2021. Т. 85. № 2. С. 218–230. DOI: 10.31857/s2587556621020035.
- Bracken L.J. Overland Flow and Soil Erosion, *Sediment Cascades*, 2010, p. 181–216.
- Burt T.P., Allison R.J. Sediment Cascades in the Environment: An Integrated Approach, *Sediment Cascades: An Integrated Approach*, 2009, p. 1–15.
- Chalov S., Prokopenko K., Habel M. North to South Variations in the Suspended Sediment Transport Budget within Large Siberian River Deltas Revealed by Remote Sensing Data, *Remote Sens.*, 2021, vol. 13, no. 22, p. 45–49.
- Chalov S.R., Shuguang L., Chalov R.S. et al. Environmental and human impacts on sediment transport of the largest Asian rivers of Russia and China, *Environ. Earth Sci.*, 2018, vol. 77, no. 7, p. 1–14.
- Chalov S.R., Potemkina T.G., Pashkina M.P. et al. Long-term changes of the budget of suspended sediment in the deltas of the tributaries of Lake Baikal, *Meteorol. Hydrol.*, 2019, vol. 10, p. 50–59.
- Church M., Slaymaker O. Disequilibrium of Holocene sediment yield in glaciated British Columbia, *Nature*, 1989, vol. 337, no. 6206, p. 452–454.
- Danielson J.J., Gesch D.B. Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED2010), Open-File Report 2011–1073, U.S., Geological Survey, 2011, p. 34.
- Tena A., Batalla R.J. The sediment budget of a large river regulated by dams (The lower River Ebro, NE Spain), *J. Soils Sediments*, 2013, vol. 13, p. 966–980.
- Ferro V., Minacapilli M. Sediment delivery processes at basin scale, *Hydrol. Sci. J.*, 1995, vol. 40, no. 6, p. 703–717.
- Gautier E., Dépret T., Caverio J. et al. Fifty-year dynamics of the Lena River islands (Russia): Spatio-temporal pattern

- of large periglacial anabranching river and influence of climate change, *Sci. Total Environ.*, 2021, vol. 783, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147020.
- Hasholt B., Bobrovitskaya N., Bogen J., Walling E. Sediment transport to the Arctic Ocean and adjoining cold oceans, *Nord. Hydrol.*, 2006, vol. 37, no. 4–5, p. 413–432.
- Magritsky D.V., Frolova N.L., Evstigneev V.M., Povalishnikov I.E.S., Kireeva M.D., Pakhomova O.M. Long-term changes of river water inflow into the seas of the Russian arctic sector, *Polarforschung*, 2018, vol. 87, no. 2, p. 177–194.
- Moreido V.M., Kalugin A.S. Assessing possible changes in Selenga R. water regime in the XXI century based on a runoff formation model, *Water Resour.*, 2017, vol. 44, no. 3, p. 390–398.
- Porter C., Morin P., Howat I. et al. Harvard Dataverse, ArcticDEM, 2016, vol. 1, URL: <https://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKH> (дата обращения 09.12.20).
- Pekel J.F., Cottam A., Gorelick N., Belward A.S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes, *Nature*, 2016, vol. 540, p. 418–422.
- Rachold V., Alabyan A., Hubberten H.W., Korotaev V.N., Zaitsev A.A. Sediment transport to the Laptev Sea – Hydrology and geochemistry of the Lena River, *Polar Res.*, 1996, vol. 15, no. 2, p. 183–196.
- Shiklomanov A., Déry S., Tretiakov M. et al. River Freshwater Flux to the Arctic Ocean, Arctic Hydrology, Permafrost and Ecosystems. Cham: Springer International Publishing, 2021, p. 703–738.
- Strauss J., Schirrmeister L., Fedorov A. et al. Circum-Arctic Map of the Yedoma Permafrost Domain, *Front. Earth Sci.*, 2021, vol. 9, p. 1–19.
- Walling D.E. The sediment delivery problem, *J. Hydrol.*, 1983, vol. 65, no. 1–3, p. 209–237.
- Walling D.E., Collins A.L. Suspended sediment sources in British rivers, *Sediment Budgets 1 IAHS Publ.*, 2005, no. 291, p. 123–133.

Поступила в редакцию 27.04.2023

После доработки 15.05.2023

Принята к публикации 24.05.2023

CHANNEL COMPONENT OF SEDIMENT YIELD: SPECIFIC FEATURES FOR THE LARGE RIVERS OF RUSSIA

S.R. Chalov¹, A.S. Zavadsky², P.P. Golovlev³, V.A. Ivanov⁴

^{1–4} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Laboratory of Soil Erosion and Channel Processes

¹ Associate Professor; D.Sc. in Geography; e-mail: srchalov@geogr.msu.ru

² Leading Scientific Researcher; Ph.D. in Geography; e-mail: az200611@rambler.ru

³ Junior Scientific Researcher; e-mail: pavel_golovlev@list.ru

⁴ Technician; e-mail: viktoro.1998@yandex.ru

Bank and riverbed erosion produce a significant part of the sediment flux, i.e. its channel component. The article deals with the quantitative assessment of the channel sediment input for more than 14 000 km of the lower reaches of the Ob, Yenisei, Lena, Kamchatka and the Selenga River net. The absolute volumes of sediments supplied by bank erosion are maximum for the lower and middle Lena River (up to 38,7 million tons per year per 100 km of the channel). They are significantly lower for the lower and middle Ob River (down to 19,9 million tons per year per 100 km of the channel), and an order of magnitude smaller (about 2 million tons per year) for the Yenisei River because of the limited conditions for the development of channel processes, and for the Selenga and Kamchatka rivers because of the smaller size of rivers. The volume of sediments of channel origin is two times smaller, than the sediment runoff, for the Yenisei River and exceeds the sediment runoff up to 9 times for other rivers. The maximum rates of bank erosion are common for meandering and branched channels with wide floodplains. Most of the bank erosion within the braided sections of channels is the deformation of islands.

Keywords: bank erosion, sediment budget, suspended load, Lena River, Yenisei River, Ob River, Selenga River, Kamchatka River

Acknowledgements. The Lena basin assessments were financially supported by the Russian Science Foundation (project 21-17-00181). Generalization of data was carried out according to the state task no. 121051100166-4 of the Makkaveev Laboratory of soil erosion and fluvial processes of the Lomonosov Moscow State University.

REFERENCES

- Alekseevskij N.I. *Formirovanie i dvizhenie rechnyh nanosov* [Formation and transport of river sediments], Moscow, Publ. MSU, 1998, 202 p. (In Russian)
- Botvinkov V.M., Ruleva S.N., Sedyh V.L., Chalov R.S. Hidroekologicheskie problemy rusla r. Obi v nizhnem b'eфе Novosibirskoj GES [Hydroecological problems of the Ob River channel in the tail bay of the Novosibirsk HPS], *Jerozionnyye i ruslovyje process*, 2005, vol. 4, p. 90–103. (In Russian)
- Bracken L.J. Overland Flow and Soil Erosion, *Sediment Cascades*, 2010, p. 181–216.
- Burt T.P., Allison R.J. Sediment Cascades in the Environment: An Integrated Approach, *Sediment Cascades: An Integrated Approach*, 2009, p. 1–15.
- Chalov R.S., Potemkina T.G., Pashkina M.P., Kasimov N.S. et al. Long-term changes of the budget of suspended sediment in the deltas of the tributaries of Lake Baikal, *Meteorol. Hydrol.*, 2019, vol. 10, p. 50–59.
- Chalov S., Prokopeva K., Habel M. North to South Variations in the Suspended Sediment Transport Budget within Large Siberian River Deltas Revealed by Remote Sensing Data, *Remote Sens*, 2021, vol. 13, no. 22, p. 45–49.
- Chalov R.S., Shuguang L., Chalov R.S. et al. Environmental and human impacts on sediment transport of the largest Asian rivers of Russia and China, *Environ. Earth Sci.*, 2018, vol. 77, no. 7, p. 1–14.
- Chalov R.S., Chalova A.S., Shkol'nyj D.I. Kolichestvennaja ocenka planovyh pereformirovanij reki Kamchatki [Quantitative assessment of channel planform changes of the Kamchatka River], *Izvestija Rossijskoj akademii nauk. Serija geograficheskaja*, 2021, vol. 85, no. 2, p. 218–230, DOI: [org/10.31857/s2587556621020035](https://doi.org/10.31857/s2587556621020035). (In Russian)
- Church M., Slaymaker O. Disequilibrium of Holocene sediment yield in glaciated British Columbia, *Nature*, 1989, vol. 337, no. 6206, p. 452–454.
- Danielson J.J., Gesch D.B. Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED2010), *Open-File Report 2011–1073, U.S., Geological Survey*, 2011, p. 34.
- Dedkov A.P., Mozzherin V.I. *Erozija i stok nanosov na Zemle* [Erosion and sediment flux on the Earth], Kazan, Publ. Kazan. Un-t, 1984, 264 p. (In Russian)
- Ferro V., Minacapilli M. Sediment delivery processes at basin scale, *Hydrol. Sci. J.*, 1995, vol. 40, no. 6, p. 703–717.
- Gautier E., Dépret T., Caverio J. et al. Fifty-year dynamics of the Lena River islands (Russia): Spatio-temporal pattern of large periglacial anabranching river and influence of climate change, *Sci. Total Environ.*, 2021, vol. 783, DOI: [org/10.1016/j.scitotenv.2021.147020](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147020).
- Gusarov A.V. Osnovnye zakonomernosti sootnoshenija ruslovoj i bassejnovoj sostavljajushchih jerozii i stoka vzveshennyh nanosov v rechnyh bassejnah severnoj Evrazii [The main regularities of the ratio between riverbed and basin components of erosion and suspended sediment flux in the Northern Eurasia's River basins], *Geomorfologija*, 2015, no. 4, p. 3–20. (In Russian)
- Hasholt B., Bobrovitskaya N., Bogen J., Walling E. Sediment transport to the Arctic Ocean and adjoining cold oceans, *Nord. Hydrol.*, 2006, vol. 37, no. 4–5, p. 413–432.
- Ivanov V.A., Chalov R.S. Ocenka balansa nanosov rek Ob' i Enisej [Sediment budget assessment of the Ob and the Enisej], *Geomorfologija*, 2021, no. 3, p. 79–89. (In Russian)
- Karashev A.V. *Rechnaja gidravlika* [River hydraulics], Leningrad, Gidrometeoizdat, 1969, 415 p. (In Russian)
- Kurakova A.A., Chalov R.S. Razmyvy beregov na shirotom uchastke srednej Obi i ih svjaz' s morfologiej rusla [Shores erosion within latitudinal section of the Middle Ob and its correlation with morphology of the channel], *Geograficheskij vestnik*, 2019, no. 3(50), p. 34–47. (In Russian)
- Magrickij D.V. Godovoj stok vzveshennyh nanosov rossijskih rek vodosbora Severnogo Ledovitogo okeana i ego antropogennye izmenenija [Annual suspended matter flow of the Russian rivers belonging to the Arctic Ocean basin and its anthropogenic transformation], *Vestn. Moscow: un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2010, no. 6, p. 17–24. (In Russian)
- Magritsky D.V., Frolova N.L., Evstigneev V.M. et al. Long-term changes of river water inflow into the seas of the Russian arctic sector, *Polarforschung*, 2018, vol. 87, no. 2, p. 177–194.
- Moreido V.M., Kalugin A.S. Assessing possible changes in Selenga R. water regime in the XXI century based on a runoff formation model, *Water Resour.*, 2017, vol. 44, no. 3, p. 390–398.
- Pekel J.F., Cottam A., Gorelick N., Belward A.S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes, *Nature*, 2016, vol. 540, p. 418–422.
- Rachold V., Alabayan A., Hubberten H.W., Korotaev V.N., Zaitsev A.A. Sediment transport to the Laptev Sea – Hydrology and geochemistry of the Lena River, *Polar Res.*, 1996, vol. 15, no. 2, p. 183–196.
- Shiklomanov A., Déry S., Tretiakov M. et al. River Freshwater Flux to the Arctic Ocean, Arctic Hydrology, Permafrost and Ecosystems, *Cham: Springer International Publishing*, 2021, p. 703–738.
- Sidorchuk A.Ju. Balans nanosov v jerozionno-ruslovyh sistemah [Sediment balance in the erosion-deposition systems], *Geomorfologija*, 2015, no. 1, p. 14–21. (In Russian)
- Strauss J., Schirmer L., Fedorov A. et al. Circum-Arctic Map of the Yedoma Permafrost Domain, *Front. Earth Sci.*, 2021, vol. 9, p. 1–19.
- Tena A., Batalla R. J. The sediment budget of a large river regulated by dams (The lower River Ebro, NE Spain), *J. Soils Sediments*, 2013, vol. 13, p. 966–980.
- Walling D.E. The sediment delivery problem, *J. Hydrol.*, 1983, vol. 65, no. 1–3, p. 209–237.
- Walling D.E., Collins A.L. Suspended sediment sources in British rivers, *Sediment Budgets 1 IAHS Publ.*, 2005, no. 291, p. 123–133.
- Porter C., Morin P., Howat I. et al. Harvard Dataverse, *ArcticDEM*, 2016, vol. 1, URL: <https://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKH> (access date 09.12.20).

Received 13.02.2023

Revised 15.04.2023

Accepted 24.05.2023