

ОЦЕНКА БАЛАНСА НАНОСОВ РЕК ОБЬ И ЕНИСЕЙ

© 2021 г. В. А. Иванов^{1,*}, С. Р. Чалов^{1,**}¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия

*E-mail: viktoro.1998@yandex.ru

**E-mail: hydroserg@mail.ru

Поступила в редакцию 09.12.2020 г.

После доработки 28.01.2021 г.

Принята к публикации 09.04.2021 г.

Проведена интегральная оценка баланса наносов рек Обь и Енисей. Численные оценки эрозии на водосборе выполнены на основе уравнений универсальной эрозии RUSLE с использованием ЦМР разрешением 250 м GMTED 2010. Оценки русловой эрозии основаны на методах полуавтоматического ГИС-дешифрирования, что позволило восстановить объемы поступления наносов за счет русловой эрозии и вычислить объемы суммарной аккумуляции вещества на водосборах этих рек. Объемы эрозии почв существенно преобладают над объемом поступления в реки материала руслового происхождения. В результате эрозии на водосборе Оби перемещается около 1250 Мт/год (или 142 Мт/год в пределах части водосбора ниже водохранилищ), в то время как русловая эрозия нижнего течения (участок длиной 1678 км от устья) составляет лишь 35 Мт/год. На водосборе Енисея перемещается около 315 Мт/год (53.6 Мт/год на незарегулированной части водосбора), русловая эрозия достигает 21.9 Мт/год на участке от дельты до гидропоста (г.п.) Ярцево у впадения Каса (1501 км от устья). В зависимости от используемых оценок стока наносов в замыкающем створе величина аккумуляции для Оби оценивается от 1220 Мт/год до 1270 Мт/год, для Енисея от 304 Мт/год до 335 Мт/год. Среднегодовой сток взвешенных наносов в устьевом створе по данным Росгидромет для Оби составляет 16 Мт/год, для Енисея 2.4 Мт/год, а по данным расчетов и полевых измерений МГУ для Оби 63.5 Мт/год, для Енисея 32.5 Мт/год. Коэффициент редукции стока наносов ниже водохранилищ для Оби и для Енисея равен 2.3, а для всей территории водосборов 20 и 30 соответственно. Основной объем перемещаемого за счет процессов денудации материала переоткладывается внутри данных эрозионно-русловых систем и не выносятся за их пределы. Сделан вывод, что крупные эрозионно-русловые системы рек России в современных гидроклиматических условиях представляют собой области аккумуляции типичные для крупных речных бассейнов Мира.

Ключевые слова: большие реки, русловая эрозия, эрозия почв, сток взвешенных наносов, аккумуляция, мутность, обратное рассеяние, Сибирь

DOI: 10.31857/S0435428121030056

ВВЕДЕНИЕ

Поступление речных наносов в русловые водотоки (речное звено эрозионно-русловой системы – ЭРС) и последующее перемещение частиц определяются сложной совокупностью меняющихся во времени и мозаично распространенных в пределах водосбора природных и антропогенных процессов. Основным средством количественного описания закономерностей этих процессов служит баланс наносов – важная характеристика эрозионно-аккумулятивного процесса, в упрощенном виде для крупного речного бассейна записывается в виде:

$$W_{\text{в}} + W_{\text{г}} = W_{\text{ак}} + W_{\text{р}} + (WR + WG), \quad (1)$$

где W – потоки вещества, т/год; $W_{\text{в}}$ – водосборная эрозия, $W_{\text{г}}$ – русловая эрозия, $W_{\text{ак}}$ – аккумуляция

на водосборе, $W_{\text{р}}$ – аккумуляция в русле, $(WR + WG)$ – сток взвешенных и влекомых наносов в устьевом створе.

Разные части уравнения существенно отличаются между собой, а для больших рек коэффициент доставки наносов, представляющий собой отношение суммарного стока наносов к объему поступающего с водосбора материала, меньше 0.5 [1]. В глобальном масштабе это проявляется в несоответствии величин стока наносов и эрозии почв. Согласно последним исследованиям, учитывающим мероприятия по защите от эрозии почв и выполненным на детальной (250 × 250 м) сетке, величина эрозии в Море оценивается в 17–18 × 10⁹ т/год [2]; эмпирические оценки стока взвешенных наносов в моря, океаны и крупные водные объекты суши, образующие области внут-

ренного стока, составляют около $15\text{--}20 \times 10^9$ т твердого материала [3], в свою очередь от 40 до 67% стока наносов формируется за счет антропогенного воздействия, а величина коэффициента доставки наносов (SDR) для всей земной поверхности — от 5 до 20% [4].

Получение надежной информации для расчета величин затрудняет ограниченность данных о роли русловых деформаций. Приводимые в литературе данные обладают большой неопределенностью и изменяются в широких пределах, например, для стока взвешенных наносов, по мнению Н.И. Алексеевского, от 1 до 64% [5]. Наиболее известные исследования, основанные на расчленении источников формирования стока наносов, связаны с работами А.П. Дедкова и А.В. Гусарова, согласно которым величина русловой составляющей общей интенсивности эрозии по стоку взвешенных наносов (δr) не превышает, в среднем, 15%: по равнинным рекам — $10.4 \pm 1.5\%$, по низкоречным рекам — $4.9 \pm 0.9\%$, по среднегорным рекам — $4.0 \pm 0.8\%$ [6]. Основной недостаток этих оценок — отсутствие фактической калибровки используемой расчетной модели, также основанной на значительных допущениях (построение зависимости между расходом воды и расходом русловых наносов по 2–3 точкам, соответствующим межени, когда предполагается отсутствие бассейновых фракций в стоке наносов). Широкое применение получили косвенные методы, основанные на выявлении соответствия состава и источников стока наносов (модель “отпечатка пальцев” (fingerprinting)). На ее основе для рек Великобритании было показано [7], что в среднем 85–95% стока взвешенных наносов связано с бассейновой составляющей (почвенно-овражная эрозия), в то время как русловая составляющая определяет 5–15% стока. При этом для части водосборов вклад русловых деформаций формирует более 40% стока взвешенных наносов. Для столь крупных бассейнов вычисления составляющих баланса наносов выполнялись только для Рейна [8]. Для данного водосбора приводятся следующие оценки: $W_6 = 3.26$ Мт/год, $(WR + WG) = 1.53$ Мт/год, $W_p = 2.99$ Мт/год, в свою очередь наиболее значимый отрицательный член баланса — это антропогенное дноуглубление $W_{антр} = 8.97$ Мт/год, а значительным источником поступления наносов в русло служит сток наносов притоков, равный 6.24 Мт/год, что в некоторой мере отражает влияние эрозии на водосборе.

Различия подобных оценок — причина отсутствия до настоящего времени единой модели баланса наносов крупного речного бассейна. В то же время современные геоинформационные базы данных и архивы спутниковых снимков позволяют значительно расширить возможности анализа и непосредственно оценить вклад русловых де-

формаций в сток наносов. Цель настоящей статьи — оценка соотношения бассейновой и русловой эрозии, аккумуляции наносов в водохранилищах и стока наносов в замыкающих створах для определения масштабных изменений процессов массопереноса крупнейших речных систем. Для этого проводилась адаптация уравнения баланса наносов для крупных речных бассейнов на примере р. Обь ($F = 2990000$ км²) и р. Енисей ($F = 2580000$ км²) (рис. 1), решались задачи разработки методики ГИС-моделирования вклада русловых деформаций в поступление материала руслового происхождения, в проведении региональных бассейновых оценок эрозии почв и сопоставлении этих данных с данными о стоке взвешенных наносов, для выявления объемов аккумуляции вещества в речном бассейне. В завершение обсуждается точность методов оценки составляющих баланса наносов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Эрозия почв на водосборе W_b (т/га в год) в работе рассматривается на основе уравнений универсальной эрозии RUSLE (табл. 1) и на основе ЦМР разрешением 250 м GMTED 2010 [9]. Пересчет оценок (т/га в год) велся по формуле:

$$W_b, \text{ т/га в год} \times 100 \times F, \text{ км}^2 = W_b, \text{ т/год.} \quad (2)$$

Поток вещества, поступающий в результате развития русловых деформаций W_6 , т/год, оценивался на основе уравнения:

$$W_6 = \frac{S_{\text{разм}} \times \rho_{\text{отл}} \times (h_6 + h_p)}{\Delta t}, \quad (3)$$

где $\rho_{\text{отл}}$ — плотность русловых отложений размываемого/намываемого берега (кг/м³), Δt — разница во времени между первым и последним снимками.

Высота берега (наводной h_6 части) получена по данным ЦММ Arctic DEM с разрешением в 2 м. Ее распространенность лишь до 60° с.ш. лимитировала расчетный участок для Оби от начала дельты до гидропоста (г.п.) Александровское в Томской области (1678 км от устья), для Енисея — от дельты до г.п. Ярцево у впадения Каса (1501 км от устья). Оценка средней глубины реки, которая для приблизительных расчетов может быть принята за глубину подруслового склона, производилась по формуле Шези. Для этого использованы глобальные базы данных HYDROAtlas [10] и GRWL [11]. Площади размыва были взяты по сопоставлению информации по данным автоматического дешифрирования GSWE [12]. Все работы по формуле (3) были автоматизированы средствами ArcGIS. Входные данные и источники для решения уравнения (3) указаны в табл. 2.

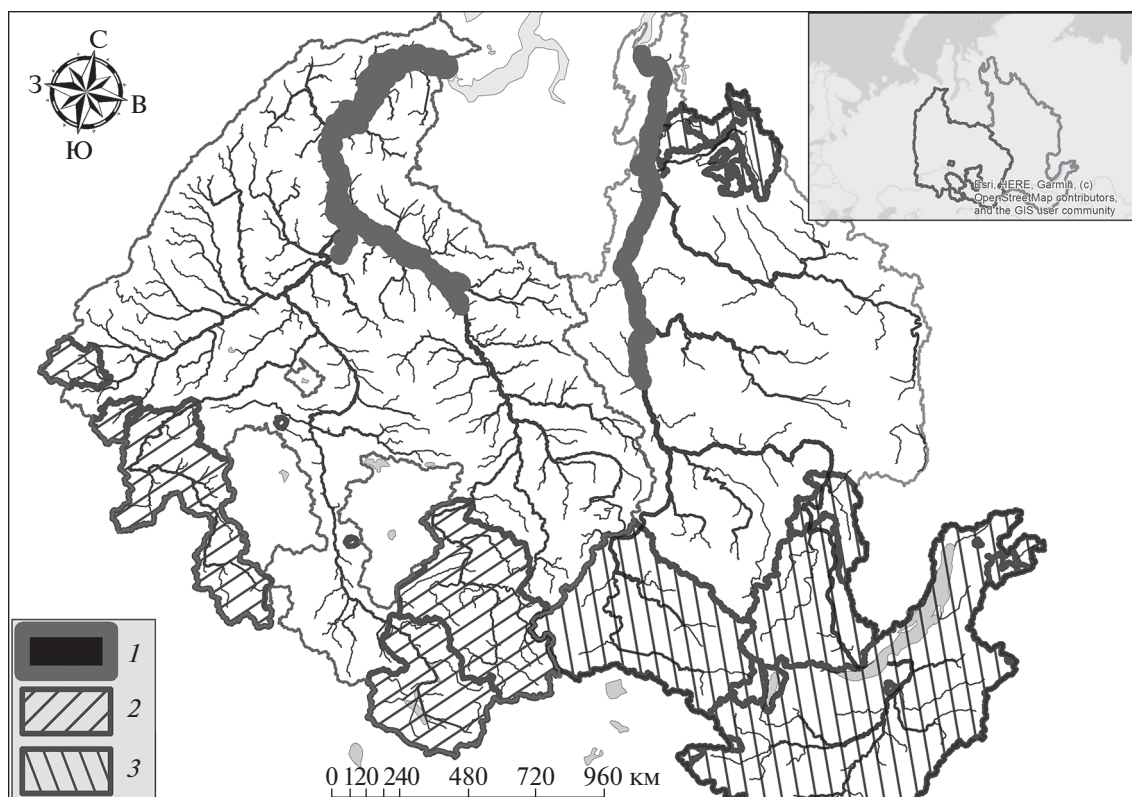


Рис. 1. Карта-схема выполненных расчетов по бассейнам Оби и Енисея.

1 – участки расчета русловых деформаций; водосборы озер и водохранилищ; 2 – в бассейне Оби, 3 – в бассейне Енисея.

Сток наносов почти полностью перехватывается аккумуляцией в пределах русловой сети W_p (в первую очередь за счет водохранилищ). В этой

связи части водосборов, расположенные выше крупнейших проточных озер и водохранилищ, исключились из уравнения (1) и расчета величины.

Таблица 1. Исходные данные для расчетов бассейновой эрозии по уравнению RUSLE

Параметр	Источник	Разрешение	Формула
$W_B = RKLSC$			
Эрозионный потенциал осадков, R	Карта эрозионного потенциала осадков [29]	30 угл. сек	$R = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \left(\sum_{r=1}^k (e_r \vartheta_r) I_{30} \right) \right)}{n}$ [26]
Фактор эродируемости почвы, K	Карта почв FAO [27]	30 угл. сек	$K = f_{csand} \times f_{cl-si} \times f_{orgc} \times f_{hisand}$ [28]
Фактор рельефа, LS	ЦМР GMTED 2010 [9]	30 угл. сек	$LS = (m+1) \left(\frac{U}{L_0} \right)^m \left(\frac{\sin \beta}{S_0} \right)^n$ [2]
Фактор подстилающего покрова, C	GlobCover 2009 карта подстилающего покрова [25]	250 м	Эмпирические коэффициенты из статей для разных регионов [25, 26]

Примечание. R – e_r – энергия дождя (МДж/мм с гектара за год); ϑ_r – количество осадков, мм; I_{30} – максимум интенсивности дождя за 30 минут; n – количество лет; K – f_{csand} – коэффициент, отвечающий за эродируемость почв с большим содержанием крупнозернистого песка и мелкозернистого песка; f_{cl-si} – коэффициент для почв с высоким содержанием илистых и глинистых частиц; f_{orgc} – коэффициент, отражающий влияние содержания орг. вещества; f_{hisand} – занижающий коэффициент для песчаных почв, эмпирические формулы LS ; U – вышележащая водосборная площадь, отнесенная к ширине потока, м²/м; L_0 , S_0 – длина и уклон стандартной стоковой площадки Уишмейера–Смита (22.1 м и 0.09°); β – крутизна склона, град.; m (0.4–0.6) и n (1.0–1.3) – эмпирические параметры, зависящие от преобладающего типа эрозии.

Таблица 2. Исходные данные для расчетов русловой эрозии

Параметр	Источник	Разрешение	Формула
$W_6 = \frac{S_{\text{разм}} \cdot \rho_{\text{отл}} \cdot (h_6 + h_p)}{\Delta t}$			
Площади размыва, $S_{\text{разм}}$	Данные автоматического дешифрирования космоснимков по поиску водных объектов GSWE [3]	30 м	Площади размыва – объекты категорий GSWE “2 – постоянно не затоплены” “7 – периодически затопляемые территории”, ставшие “постоянно затопленными”
Высота берегов, h_6	ЦМР ArcticDEM [30]	2 м	$h_6 = h_{\text{п}} - h_{\text{вод}}$
Средняя глубина реки, h_p	Глобальные БД уклонов и расхода воды HYDROAtlas [11]; Глобальная база данных ширин рек GRWL [12]	3 угл. сек	$Q = \omega \cdot C \cdot \sqrt{RI}$, $C = \frac{1}{n} h^{\frac{1}{6}}$, $h_p = \left(\frac{Q \cdot n}{B \cdot \sqrt{I}} \right)^{\frac{3}{5}}$
Плотность грунтов	Литературные обзоры, полевые измерения	–	–

Примечание. ρ – плотность русловых отложений размываемого/намываемого берега, кг/м³; Δt – разница во времени между первым и последним снимком для ресурса GSWE это 34 года (1984–2018), с; h_6 – относительная высота берега, м; $h_{\text{п}}$ – абс. высота поймы (берега), м; $h_{\text{вод}}$ – абс. отметки водной поверхности в зимнюю межень, м; h_p – средняя глубина реки, м; Q – расход воды, м³/с; ω – площадь сечения, м²; C – коэффициент Шези, м^{0.5}/с; R – гидравлический радиус, м, приближенно равен ширине реки B ; I – уклон; n – коэффициент шероховатости, безразмерный.

Интегрально аккумуляция наносов в пределах всего речного бассейна оценивалась в работе как:

$$W_{\text{ак}} + W_p = W_{\text{в}} + W_6 - (WR + WG). \quad (4)$$

Для оценки величины $(WR + WG)$ использованы 2 метода. Метод 1 предполагал использование сетевых данных о стоке наносов Оби и Енисея по информации с замыкающих створов (г.п. Салехард для Оби и г.п. Игарка для Енисея). Ряды наблюдений для данных рек имеют продолжительность в 78 лет для обоих гидрологических постов с 1938 по 2016 г., хотя в случае г.п. Игарка наблюдается значительная нестационарность ряда, связанная со строительством водохранилищ на Енисее и Ангаре, что приводит к необходимости деления ряда на части и требования вести их рассмотрение отдельно [14]. В случае г.п. Игарка, оценка среднемноголетнего стока наносов производилась за период с 1992 по 2016 г. (24 года) [14].

Метод 2 основан на измерении расходов наносов с использованием доплеровских измерителей скоростей течений ADCP RiverRay 600 кГц экспедицией МГУ и пересчете этих данных в годовые объемы стока наносов. На Оби полевые съемки проводились в створе г.п. Салехард в три временных периода разной водности: в конце летне-осенней межени (2 измерения 22 и 24 сентября 2018 г.; 1 измерение в начале зимней межени со

льда 12 ноября 2018 г.; 2 измерения на спаде весенне-летнего половодья 27 июня и 1 июля 2019 г. Измерения на Енисее в створе г.п. Игарка проводились 3 раза в период половодья 4, 13, 16 июня 2019 г. Была получена региональная зависимость между обратным рассеянием и измеренной мутностью воды:

$$SSC_{ADCP} = 10^{(C'' + K_c S_v)}, \quad (5)$$

где SSC_{ADCP} – мутность в ячейке ADCP, C'' и K_c – коэффициенты в линейной регрессии, отражающие комплексное влияние частоты излучения прибором и рассеянием лучей в чистой воде, S_v – обратное рассеяние.

$$SSC_{ADCP} = 10^{(0.914 + 0.014 S_v)}. \quad (6)$$

Для восстановления значений S_v в придонной части профиля для каждого ансамбля были построены кривая распределения скорости по вертикали Гришанина (7) и кривая мутности Рауза (8):

$$U_h = U_{\text{пов}} - \frac{\sqrt{ghI}}{k} \ln\left(\frac{h}{z}\right), \quad (7)$$

где U – скорость: пов – у поверхности, h – на исковой глубине; h – глубина реки, z – расстояние от дна, I – уклон.

Таблица 3. Восстановленный годовой ход расходов наносов по расходам воды на постах (расчет стока наносов методом 2)

Река	Средне- месячный расход	Месяцы												Σ, Мт/ год
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Обь, Салехард	воды, м³/с	4900	4100	3600	3740	15700	32600	29300	21800	13700	10400	6720	5590	
Енисей, Игарка		8430	8270	8020	8170	38900	60900	21000	16500	18100	14440	9990	8480	
Обь, Салехард	наносов, т/с	0.38	0.27	0.21	0.22	1.60	6.86	5.54	3.06	2.99	1.72	0.72	0.50	63.5
Енисей, Игарка		0.13	0.12	0.12	0.12	2.72	6.65	0.79	0.49	0.59	0.37	0.18	0.13	
														32.5

Таблица 4. Баланс наносов для водосборов Оби и Енисея по данным измерений стока наносов методом 1 и 2

МТ/год	Эрозия			Метод оценки стока наносов	Сток наносов	Аккумуляция, Σ		K _{ред}	
	русловая	водосборная				ниже водохрани- лищ	общая (100%)	ниже водохрани- лищ	общая (100%)
		ниже водохрани- лищ	общая (100%)						
Обь	35	142 (11%)	1250	1	16.0	161	1270	11.1	80.3
				2	63.5	85.5	1220	2.3	20
Енисей	21.9	53.6 (17%)	315	1	2.4	73.2	335	32.8	146
				2	32.5	43	304	2.3	10

$$\frac{S}{S_a} = \left(\frac{h-z}{z} \frac{a}{h-a} \right)^{R_0}, \quad (8)$$

где S – мутность на горизонте, S_a – придонная мутность, h – глубина профиля мутности, z – расстояние от дна, R_0 – число Рауза, a – слой придонной мутности, принимаемый равным $2 \cdot D_{50}$, где D_{50} – средний диаметр донных отложений, принятых за диаметр среднезернистого песка в 0.5 мм.

Переход от мутности S к частному расходу взвешенных наносов осуществляется по формуле (9), путем перемножения значений скорости и мутности в ячейках профиля отдельно для каждого ансамбля и глубины. При едином размере ячеек их сумма составляет моментальный расход взвешенных наносов в поперечном профиле реки (9):

$$WR = \sum_{i=1}^n S_i \cdot U_i. \quad (9)$$

Пересчет измеренных расходов взвешенных наносов в среднегодовые значения выполнен на основе уравнения Маккавеева [5] (10). Для этого был вычислен по измеренным значениям расхода воды и наносов средний эрозионный коэффициент A . Для Енисея он составил в среднем 0.68. Для Оби эрозионный коэффициент был рассчитан отдельно для межени и для половодья и составил соответственно 1.06 и 0.42. Подстановка этих зна-

чений и использование среднемесячных величин расходов воды Q позволили получить среднегодовые значения $WR + WG$ (табл. 3).

$$(WR + WG) = A Q^2 I, \quad (10)$$

где A – эрозионный коэффициент, Q – расход воды, R – расход наносов, I – уклон водной поверхности на посту.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Получены численные оценки параметров баланса наносов (1) для водосборов (табл. 4, рис. 2). На Енисее при суммарном объеме дождевой эрозии $W_{\text{эр}} = 315$ млн т/год, только в бассейне Байкала формируется и полностью перехватывается около половины продуктов бассейновой эрозии – 167 млн т/год. В результате объем продуктов эрозии $W_{\text{эр}}$, доступный для транспорта рекой в нижней части бассейна, на Енисее составляет около 17% от суммарной эрозии, что вместе с влиянием факторов $W_{\text{русл}}$ существенно уменьшает вклад бассейновой составляющей в итоговый сток наносов Енисея. Для водосбора Оби потенциальный поток продуктов эрозии составляет $W_{\text{эр}} = 1250$ млн т/год, но практически весь (около 89%) сток наносов перехватывается водохранилищами в верховьях Оби – Новосибирским, и Иртыша – Шульбинским (рис. 2). Итоговое значение доступной для транспорта эрозии состав-

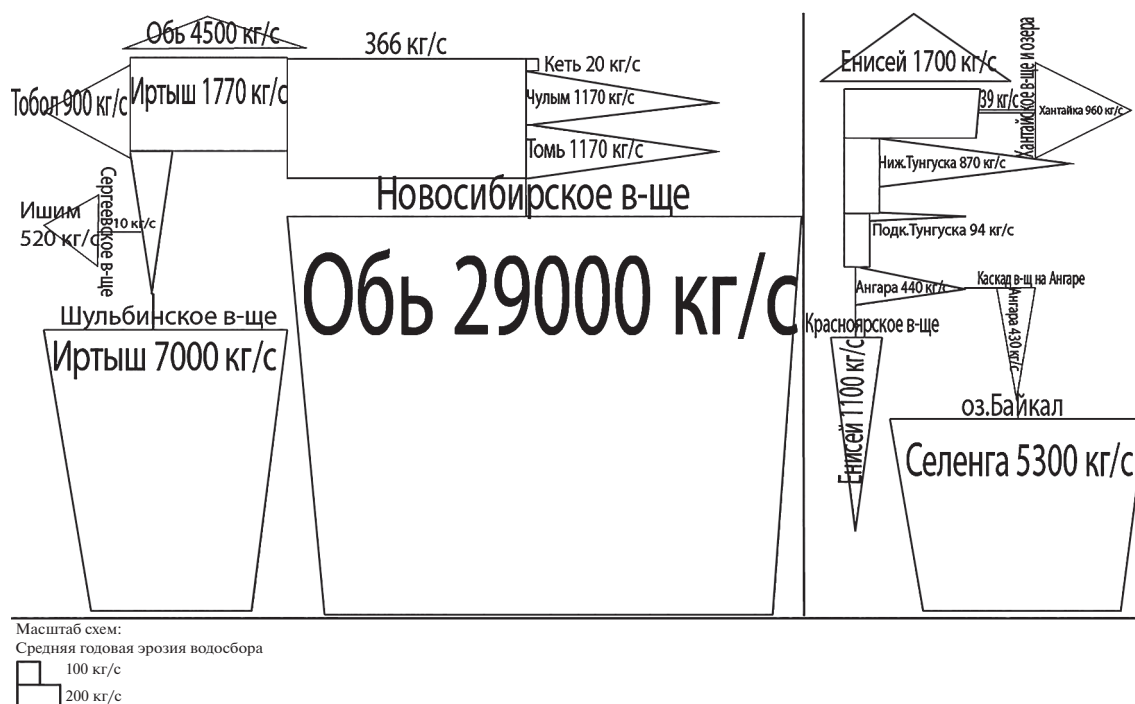


Рис. 2. Схема потоков вещества на водосборах Оби и Енисея.
Площадь фигур пропорциональна величине водосборной эрозии (кг/с).

ляет 11% от суммарной эрозии на водосборе в 142 млн т/год.

Русловая эрозия Оби от верхней границы дельты до г.п. Александровское в Томской области (1680 км от устья) оценивается в 35.0 Мт/год. На Енисее от дельты до г.п. Ярцево у впадения Каса (1500 км от устья) в русло поступает 21.9 Мт/год.

Аккумуляция в бассейне Оби, рассчитанная по уравнению (4), при оценке стока наносов по методу 1 составляет 1270 Мт/год для Оби и 335 Мт/год для Енисея. Если учитывать только территорию водосбора ниже водохранилищ, то для Оби она равна 161 Мт/год и для Енисея 73.2 Мт/год. При оценке $WR + WG$ методом 2 суммарная аккумуляция материала в бассейне Оби оценивается 1220 Мт/год, для Енисея 304 Мт/год. Для территорий водосбора ниже плотин аккумуляция составляет 85.5 Мт/год для Оби и вдвое меньше для Енисея (43.0 Мт/год).

ОБСУЖДЕНИЕ

В пределах крупных речных бассейнов объемы эродированного на водосборе материала значительно превышают объемы материала, эродированного в русле. Объемы поступления продуктов русловой эрозии в пределах нижнего течения крупных рек сопоставимы со стоком наносов, а учитывая, что они непосредственно поступают в русла реки, можно предполагать крайне высокие

значения генетических коэффициентов русловой эрозии. Для средней (ниже слияния с р. Вах) и нижней Оби и нижнего Иртыша (ниже Горноправдинска) в результате русловых деформаций в русло поступает 35 Мт/год, в то время как весь объем доступных (без учета части перехватываемой водохранилищами территории) продуктов эрозии почв (потенциальной эрозии) оценивается в 1250 Мт/год.

На отличия оценок существенно влияет точность оценки стока наносов. Сток наносов по методу 1 существенно ниже оценок по методу 2 (для Оби в 3.8 раза, для Енисея в 13.5 раза). Соответствующие расчеты величин аккумуляции, а значит и ее значение для балансов наносов по методу 1, возрастают. Особенно ярко это прослеживается для незарегулированных частей водосборов, где объемы эродированного с водосборов материала, согласно произведенным расчетам, не так велики. Для Оби по методу 2 суммарная величина аккумуляции для водосбора ниже водохранилищ оценивается в 161 Мт/год, что выше полученных значений по методу 1 в 2 раза, а для незарегулированной части водосбора Енисея эта величина, рассчитанная по методу 2, составляет 73.2 Мт/год, т.е. превышает оценки относительно метода 1 (43.0 Мт/год) в 1.7 раза.

Приведенные расчеты позволяют сделать вывод об аккумулирующем типе развития эрозионно-русловых систем крупных рек. Лишь малая

часть всего размытого материала транспортируется к устьевому створу, что характеризует коэффициент редукции стока наносов (12):

$$K_{\text{ред}} = \frac{W_{\text{в}} + W_{\text{г}}}{(WR + WG)}. \quad (11)$$

Принимая сток наносов, рассчитанный по методу 1 по данным Росгидромета, $K_{\text{ред}}$ для всего водосбора, включая водосборы водохранилищ, $K_{\text{ред}}$ по формуле (11) составит 80.3 для Оби и 146 для Енисея. Если вычисления $K_{\text{ред}}$ произвести только для территорий ниже водохранилищ, т.е. исключить из суммарной эрозии ($W_{\text{в}} + W_{\text{г}}$) эрозию водосборов водохранилищ, то для Оби $K_{\text{ред}}$ увеличится до 11.1, для Енисея 32.8.

Рассчитывая сток наносов методом 2 и принимая во внимание суммарную эрозию водосборов, включая ($W_{\text{в}} + W_{\text{г}}$) с зарегулированных областей, коэффициент редукции стока наносов $K_{\text{ред}}$ по формуле (11) для Оби составляет 2.27, а для Енисея 2.30. Для нижних течений рек (ниже водохранилищ) с увеличением транспортирующей роли потока $K_{\text{ред}}$ для Оби значение коэффициента редукции стока наносов повышается на порядок, достигая 20, для Енисея он увеличивается в 4 раза и составляет 10.

Важным представляется обсуждение точности и верификации полученных значений, в уравнениях баланса наносов на водосборе (1). Расчеты годовых объемов водной эрозии по уравнению RUSLE (т/га в год) верифицируются по данным о многолетних годовых значениях почвенной эрозии. Наиболее детальная верификация данных моделирования RUSLE приведена в работе [2]. Они демонстрируют высокую сходимость с оценкой распространения деградированных земель Global Assessment of Land Degradation and Improvement (GLADA), основанную на анализе индексов NDVI [15]. Особенно точное соответствие отмечается для территорий Центральной и Южной Америки, Африки, Океании, Восточной части США, Восточной Европы и Японии. Также сравнение расчетов [2] с экспериментальными и косвенными эмпирическими (накопление наносов в водохранилищах, ряды стока наносов) данными по более чем 2500 участков по всему миру [16] также дают основание говорить о достоверности моделирования.

На исследуемой территории Сибири функционируют около шести стационаров на разных типах почв [17]. Так, было выполнено сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными опытно-производственного стационара при Алтайском НИИСХ на склонах крутизной от 2° до 4° [18], который располагается в водосборе Оби, в пригороде г. Барнаула. Здесь смыл почвы на участке, занятом многолетними

травмами, составил 1.7 т/га в год. Для зябей, в среднем, — 14.5 т/га в год, для вспаханной почвы (зябь, стерня) — 13.4 т/га в год. Сравнивая с моделируемыми значениями для данной стационара, участки которой менее подвержены эрозии и не обрабатываются (определенные по данным дешифрирования GlobCover 2009 [19] как территории с разреженной растительностью), эродируется 0.5–1 т/га и 1–2 т/га, что сходно со значениями водной эрозии для опытных участков с посевом многолетних трав. В то же время с территорий, классифицируемых GlobCover 2009 как “crop-land” (англ. с/х поля), согласно по расчетам RUSLE эродируется 11.4 т/га, что во многом соответствует значениям сноса почвы с зябей стационара при Алтайском НИИСХ.

В труде [20] приводятся обобщенные данные значений водной и талой эрозии в зоне обрабатываемых участков лесостепи и степей западной Сибири на пунктах стационарных наблюдений. Значения величины талой эрозии составляют от 4.5 до 8.1 т/га, а водной эрозии — 17.1 т/га. Такие значения водной эрозии действительно сопоставимы с теми, что наблюдаются по расчетам модели. Оценка по модели RUSLE дает 11.4 т/га в год для распаханной территории в данной области. В восточной Сибири, а также в средней и северной части водосбора натурные измерения водной эрозии не производились [20].

Характеризуя качество моделирования, можно сказать, что по данным вышеприведенных сравнений погрешность методики оценки эрозии почв, занятых многолетними травами, составляет 53%, в сторону занижения результатов, для пашни занижение составляет от 20 до 50%.

Точность измерений стока наносов можно оценить, сопоставив сетевые данные с данными экспедиций МГУ. Как для Оби, так и для Енисея сток наносов, рассчитанный методом 1, по данным Росгидромет, значительно меньше расчетов методом 2. Это вызвано тем, что, во-первых, для г.п. Игарка произошло занижение расходов воды, определенных по некондиционным кривым $Q = f(h)$, в то время как измерения проводились в момент пика половодья, когда завышение составило от 6.7 до 12%. Во-вторых, произошло занижение оценки средней мутности. Причиной этому является нерепрезентативность отбираемых проб для г.п. Салехард, а также использование фильтров “Белая лента”, с диаметром пор (10–12 мкм), приводящих к занижению получаемых оценок мутности [21] по некондиционным кривым $(R + G) = f(H)$ для г.п. Игарка. Так, средняя мутность для г.п. Игарка была занижена в среднем на 386–810%, а для г.п. Салехард на 81%. Такое занижение мутности приводит к значительному занижению общих моментальных рас-

ходов наносов — для г.п. Игарка от 4.5 до 8 раз, для г.п. Салехард в 1.7–1.9 раза.

Поэтому наблюдаются различия между рассчитанным среднегодовым стоком наносов по методу 2, и значениями, полученными путем стандартной статистической обработки, изложенной в труде [14], т.е. методом 1. Разница между расчетами годового стока взвешенных наносов составляет 287% для Оби и 158% для Енисея.

Наиболее сложной для верификации представляется русловая эрозия. Были сопоставлены результаты определения зон размыва по данным автоматического дешифрирования GSWE [12] с данными ручной обработки снимков. Последний способ был выполнен для средней и нижней Оби в работе А.А. Кураковой и Р.С. Чалова [22]. Сравнивая результаты ручной и автоматизированного ГИС-дешифрирования, выявлена высокая сходимость результатов, где погрешность площадей размывов GSWE достигает 10.5%.

Имея результаты оценок отдельных компонентов баланса вещества на водосборе, можно сделать вывод о роли того или иного компонента в формировании стока наносов. Так, для Оби водосборная эрозия существенно выше енисейских значений как суммарно (1250 Мт/год > 317 Мт/год), так и на незарегулированной его части ниже всех водохранилищ (35.0 Мт/год > 21.9 Мт/год). Это ярко иллюстрирует тот факт, что различия в физико-географических условиях водосборов, таких как меньшая заселенность, большая распаханность бассейна Оби и иные подстилающие породы, увеличивают водосборную эрозию и поступление наносов. Величина береговой эрозии на Оби (35.0 Мт/год) также больше, по сравнению с Енисеем (21.9 Мт/год). Это вызвано различными условиями формирования русла: если для широкопойменного песчаного русла Оби характерны масштабные переформирования с массовым переносом вещества, то для Енисея с его врезанным руслом боковая эрозия выражена слабее, хотя в связи с малой интенсивностью водосборной эрозии приобретает большую роль в формировании стока наносов. Сток взвешенных наносов Оби за счет большей мутности превышает сток наносов на Енисее почти в 2 раза по данным МГУ и в 7 раз по данным Росгидромет. Полученная по разности элементов баланса величина аккумуляции в бассейнах сопоставима по значению с другими компонентами баланса наносов — для Оби (56.5 Мт/год) она соответственно больше, чем на Енисее (43 Мт/год). Такие высокие значения аккумуляции свойственны низовьям больших рек, характеризующихся аккумулярующим режимом [23]. Например, сходные соотношения между элементами баланса наносов имеются для низовий Амазонки, где сток наносов в замыкающем створе равен 1240 Мт/год, когда аккумуляция в долине в разных ее проявлениях равна

2070 Мт/год, а эрозия берегов составляет 1570 Мт/год [24]. За счет размеров бассейна разница между приходными и расходными составляющими баланса наносов на порядок превосходит соответствующее значение рек Восточно-Европейской равнины [31].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые для крупных речных бассейнов предложена и адаптирована методика разноуровневых оценок основных составляющих баланса наносов: эрозии почв, русловой эрозии, стока наносов и аккумуляции наносов на водосборах и в руслах рек.

2. Объемы эрозии почв существенно преобладают над объемом поступления в реки материала руслового происхождения. В результате эрозии на водосборе Оби перемещается около 1250 Мт/год (или 142 Мт/год в пределах части водосбора ниже водохранилищ), в то время как русловая эрозия нижнего течения (участок длиной 1680 км от устья) составляет лишь 35.0 Мт/год. На водосборе Енисея перемещается около 315 Мт/год (53.6 Мт/год на незарегулированной части водосбора), русловая эрозия достигает 21.9 Мт/год на участке от дельты до г.п. Ярцево у впадения Каса (1501 км от устья). Среднегодовой сток взвешенных наносов в устьевом створе по данным Росгидромет для Оби составляет 16 Мт/год, для Енисея 2.4 Мт/год, а по данным расчетов и полевых измерений МГУ для Оби 63.5 Мт/год, для Енисея 32.5 Мт/год.

3. Исследуемые речные бассейны в современных гидроклиматических условиях представляют собой области аккумуляции.

4. Выполнены оценки точности оценки составляющих уравнения баланса наносов. Для водной эрозии превышения экспериментальных значений над расчетными не превышают 20–50%. Верификация данных ручной оцифровки и автоматического дешифрирования вклада русловых деформаций свидетельствует об отклонении последних на величину до 10.5%.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнялось в рамках проекта РФФИ Арктика № 18-05-60219. Полевые работы выполнены при поддержке проекта РФФИ № 19-05-50109. Анализ русловых процессов проведен в рамках проекта РНФ 18-17-00086. Оценки точности моделирования эрозии почв выполнены в рамках выполнения проекта РНФ 21-17-00181.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сидорчук А.Ю. Баланс наносов в эрозионно-русловых системах // Геоморфология. 2015. № 1. С. 14–21.
2. Borrelli P., Robinson D.A., Fleischer L.R., Lugato E., Ballabio C., Alewell C., Meusburger K., Modugno S.,

- Schütt B., Ferro V., Bagarello V., Oost K.V., Montanarella L., and Panagos P.* An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion // *Nature Communications*. 2017. № 1 (8). 2013. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>
3. *Milliman J.D.* River Inputs. 2010. P. 754–761. <https://doi.org/10.1016/B978-012374473-9.00074-6>
 4. *Panin A.V.* Land-ocean sediment transfer in palaeo-times, and implications for present-day natural fluvial fluxes. *Sediment Transfer through the Fluvial System* (Proceedings of a symposium held in Moscow, August 2004). IAHS Publ. 288, 2004.
 5. Эрозионно-русловые системы / Под ред. Р.С. Чалова, А.Ю. Сидорчука, В.Н. Голосова. М.: ИНФРА, 2017. 698 с.
 6. *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.
 7. *Walling D.E. and Collins A.L.* Suspended sediment sources in British rivers // *Sediment Budgets 1 IAHS Publ.* 2005. No. April (291). P. 123–133.
 8. *Fring R.M., Hillebrand G., Gehre N., Banhold K., Schriever S., and Hoffmann T.* From source to mouth: Basin-scale morphodynamics of the Rhine River // *Earth-Science Reviews*. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.002>
 9. *Danielson J.J. and Gesch D.B.* Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED2010). U.S. Geological Survey Open-File Report, 2011-1073, 26 p.
 10. *Linke S., Lehner B., Dallaire O.C., Ariwi J., Grill G., Anand M., Beames P., Burchard-Levine V., Maxwell S., Moidu H., Tan F., and Thieme M.* Global hydro-environmental sub-basin and river reach characteristics at high spatial resolution // *Sci Data*. 2019 Dec 9; 6 (1): P. 283–298.
 11. *Allen G.H. and Pavelsky T.* Global extent of rivers and streams // *Science*. 2018. Vol. 361. Iss. 6402. P. 585–588.
 12. *Pekel J.F., Cottam A., Gorelick N., and Belward A.S.* High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes // *Nature*. 2016. Vol. 540. P. 418–422.
 13. *Vörösmarty C., Meybeck M., Fekete B.M., Sharma K., Green P., and Syvitski J.* Anthropogenic sediment retention: Major global impact from registered river impoundments // *Global and Planetary Change*. 2003. No. 1–2 (39). P. 169–190.
 14. *Магрицкий Д.В.* Годовой сток взвешенных наносов российских рек водосбора северного Ледовитого океана и его антропогенные изменения // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География*. 2010. С. 17–24.
 15. *Bai Z.G., Dent D.L., Olsson L., and Schaepman M.L.E.* Global assessment of land degradation and improvement 1: identification by remote sensing // *Report 2008/01, FAO/ISRIC-Rome/Wageningen*. 2008. P. 68.
 16. *García-Ruiz J.M., Beguería S., Nadal-Romero E., González-Hidalgo J.C., Lana-Renault N., and Sanjuán Y.* A meta-analysis of soil erosion rates across the world // *Geomorphology*. 2015. Vol. 239. P. 160–173.
 17. Научные стационары: реалии, научная проблематика и инновации Томск: Графика, 2017. 265 с.
 18. *Вольнов В.В., Бойко А.В., Чичкарев А.С.* Опыт использования противоэрозионных гидротехнических сооружений в борьбе со стоком талых вод и смывом пахотных почв на склоновых землях Алтайского края // *Вестн. Алтайского гос. аграрного ун-та*. 2017. С. 42–48.
 19. *Bontemps S., Van Bogaert E., Defourny P., Kalogirou V., and Arino O.* GLOBCOVER 2009 Products Description and Validation Report // *ESA Bulletin*. 2011. P. 53.
 20. *Литвин Л.Ф.* География эрозии почв сельскохозяйственных земель России. М.: Академкнига, 2002. 255 с.
 21. *Чалов С.Р., Терский П.Н., Ефимова Л.Е., Терская А.И., Ефимов В.А., Данилович И.С.* Проблемы гидрологического мониторинга в бассейнах трансграничных рек Восточной Европы (на примере Западной Двины) // *Инженерные изыскания*. 2019. Т. XIII. № 1. С. 32–44.
 22. *Куракова А.А., Чалов Р.С.* Размывы берегов на широтном участке средней обии и их связь с морфологией русла // *Географический вестник*. 2019. № 3 (50). С. 34–47.
 23. *Чалов Р.С., Евстигнеев В.М., Зайцев А.А.* Русловой режим рек Северной Евразии (в пределах бывшего СССР). М.: Изд-во МГУ, 1994. 335 с.
 24. *Dunne T., Mertes L.A.K., Meade R.H., Richey J.E., and Forsberg B.R.* Exchanges of sediment between the flood plain and the channel of the Amazon River in Brazil // *Geological Society of America Bulletin*. 1998. Vol. 110. P. 450–467.
 25. *Panagos P., Borrelli P., Meusburger K., Alewell C., Lugato E., and Montanarella L.* Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale // *Land Use Policy*. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.05.021>
 26. *Morgan R.P.C. and Nearing M.A.* Handbook of Erosion Modelling / Wiley-Blackwell, New Jersey. 2011. P. 68.
 27. IUSS Working Group WRB World Reference Base for Soil Resources 2014, updates 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 2015.
 28. *Sharpley A.N. and Williams J.R.* Erosion Productivity Impact Calculator: 1. Model Documentation (EPIC) // *Technical Bulletin-United States Department of Agriculture*. 1990. № 1768. P. 235.
 29. *Panagos P., Boni M., Ballabio C., Borrelli P., Meusburger K., Yu B., Klik A., Lim K.J., Yang J.E., Ni J., Miao C., Chattopadhyay N., Sadeghi S.H., Hazbavi Z., Zabihi M., Larionov G.A., Krasnov S.F., Gorobets A.V., Levi Y., Erpul G., Birkel C., Hoyos N., Naipal V., Oliveira P.T.S., Bonilla C.A., Meddi M., Nel W., Al Dashiti H., Diodato N., Van Oost K., and Nearing M.* Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records // *Scientific Reports*. 7. 4175. 2017. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04282-8>
 30. *Porter C., Morin P., Howat I., Noh M-J., Bates B., Peterman K., Keesey S., Schlenk, M., Gardiner J., Tomko K., Willis M., Kelleher C., Cloutier M., Husby E., Foga S., Nakamura H., Platson, M., Wethington M.J., Williamson C., Bauer G., Enos J., Arnold G., Kramer W., Becker P., Doshi A., D'Souza C., Cummins P., Laurier F., and*

Bojesen M. "ArcticDEM". Harvard Dataverse, V1, [Дата доступа 09.12.20].
<https://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKH>

31. Sidorchuk A. Yu. The fluvial system on the East European plain: sediment source and sink // *Geography, Environment, Sustainability*. 2018. Vol. 11. Iss. 3. P. 5–20.

Sediment budget assessment of the Ob and the Yenisei

V. A. Ivanov^{a,#} and S. R. Chalov^{a,##}

^a *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia*

[#] *E-mail: viktoro.1998@yandex.ru*

^{##} *E-mail: hydroserg@mail.ru*

This paper presents results of comparative analysis of the sediment budgets of the Ob' and the Yenisei, based on universal erosion equations, RUSLE using 250 m resolution DEM GMTED 2010. Cumulative volumes of sediments accumulated in the stream catchments were estimated calculating the difference between erosion and sediments runoff of the studied basins. Thus, the difference between total erosion (watershed erosion + bank erosion) is (1250 MT/year + 35 MT/year) for the Ob and (315 MT/year + 21.9 MT/year) for the Yenisei. Sediment runoff in the mouths of both rivers estimated based on MSU data is 63.5 MT/year for the Ob and 32.5 MT/year for the Yenisei; Sediment runoff in the mouths estimated based on Roshydromet data is 16 MT/year for the Ob and 2.4 MT/year for the Yenisei. Sediment runoff was used to calculate the total deposition of matter in the catchment area during the transport of sediments from sources to sinks, for the Ob total deposition is 1270 MT/year, for the Yenisei is 335 MT/year. For the unregulated part of the Ob' catchment, the accumulation was 56.5 MT/year, and for the unregulated part of the Yenisei catchment was 43 MT/year. The coefficient of reduction of sediment runoff (1/SDR) downstream, based on new samplings of sediment runoff in 2018–2019 in the mouths of both, Ob and Yenisei, was 2.3, and for the entire catchment area 20 and 30 respectively. Volume of sediments moved by denudation processes in the basin ends up being redeposited within the same fluvial systems. Thus, under the current hydro-meteorological regime, the large drainage basins in Russia and elsewhere are major depositional systems.

Keywords: large rivers, bank erosion, soil loss, sediment runoff, deposition, SSC, backscatter intensity, ADCP, Siberia

ACKNOWLEDGMENTS

The study was carried out within the framework of the RFBR Arctic project No. 18-05-60219. The field work was carried out with the support of the RFBR project No. 19-05-50109. The analysis of the channel processes was carried out within the framework of the RSF project No. 18-17-00086. Assessments of the accuracy of soil erosion modelling have been carried out as part of the RSF project No. 21-17-00181.

REFERENCES

1. Sidorchuk A. Yu. *Balans nanosov v erozionno-ruslovykh sistemakh* (The balance of sediments in erosion-channel systems). *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2015. (1). P. 14–21. (in Russ.)
2. Borrelli P., Robinson D. A., Fleischer L. R., Lugato E., Ballabio C., Alewell C., Meusburger K., Modugno S., Schütt B., Ferro V., Bagarello V., Oost K. V., Montanarella L., and Panagos P. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communications*. 2017. № 1 (8). 2013. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>
3. Milliman J. D. River Inputs, 2010, P. 754–761.
4. Panin A. V. Land-ocean sediment transfer in palaeotimes, and implications for present-day natural fluvial fluxes. *Sediment Transfer through the Fluvial System* (Proceedings of a symposium held in Moscow, August 2004). IAHS Publ. 288. 2004.
5. *Eroзионno-ruslovye sistemy* (Erosive-channel systems). R. S. Chalov, A. Yu. Sidorchuk, V. N. Golosov (Eds.). INFA, 2017. 698 p. (in Russ.)
6. Gusarov A. V. *Osnovnye zakonomernosti sootnosheniya ruslovoi i basseinovoi sostavlyayushchikh erozii i stoka vzveshennykh nanosov v rechnykh basseynakh severnoi Evrazii* (Basic regularities of the ratio of the channel and basin components of erosion and runoff of suspended sediments in the river basins of northern Eurasia). *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2015. No. 4. P. 3–20. (in Russ.)
7. Walling D. E. and Collins A. L. Suspended sediment sources in British rivers. *Sediment Budgets 1 IAHS Publ.* 2005. № April (291). P. 123–133.
8. Frings R. M., Hillebrand G., Gehres N., Banhold K., Schriever S., and Hoffmann T. From source to mouth: Basin-scale morphodynamics of the Rhine River. *Earth-Science Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.002>, 2019
9. Danielson J. J. and Gesch D. B. Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED2010). U.S. Geological Survey Open-File Report. 2011–1073. 26 p.
10. Linke S., Lehner B., Dallaire O. C., Ariwi J., Grill G., Anand M., Beames P., Burchard-Levine V., Maxwell S., Moidu H., Tan F., and Thieme M. Global hydro-environmental sub-basin and river reach characteristics at

- high spatial resolution. *Science Data*. 2019 Dec 9; 6(1): P. 283–298.
11. Allen G.H. and Pavelsky T. Global extent of rivers and streams. *Science*. Vol. 361. Issue 6402. 2018. P. 585–588.
 12. Pekel J.F., Cottam A., Gorelick N., and Belward A.S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*. 2016. Vol. 540. P. 418–422.
 13. Vörösmarty C., Meybeck M., Fekete B.M., Sharma K., Green P., and Syvitski J. Anthropogenic sediment retention: Major global impact from registered river impoundments. *Global and Planetary Change*. 2003. No. 1–2 (39). P. 169–190.
 14. Magritskii D.V. *Godovoi stok vzyvshennykh nanosov Rossiiskikh rek vodosbora Severnogo Ledovitogo okeana i ego antropogennye izmeneniya* (Annual runoff of suspended sediment Russian river catchment in the Northern Arctic ocean and its anthropogenic changes). *Vestnik Moskovskogo universiteta* (Bulletin of the Moscow University). Series 5. Geography. 2010. P. 17–24. (in Russ.)
 15. Bai Z.G., Dent D.L., Olsson L., and Schaepman M.E. 1 Global assessment of land degradation and improvement 1: identification by remote sensing. Report 2008/01, FAO/ISRIC-Rome/Wageningen. 2008, 68 p.
 16. García-Ruiz J.M., Beguería S., Nadal-Romero E., González-Hidalgo J.C., Lana-Renault N., Sanjuán Y. A meta-analysis of soil erosion rates across the world. *Geomorphology*. 2015. Vol. 239. P. 160–173.
 17. *Nauchnye statsionary: realii, nauchnaya problematika i innovatsii* (Scientific field station: challenges, research issues and innovations) Tomsk: Grafika (Publ.), 2017. 265 p. (in Russ.)
 18. Vol'nov V.V., Boiko A.V., and Chichkarev A.S. *Opyt ispol'zovaniya protivoozozionnykh gidrotekhnicheskikh sooruzhenii v bor'be so stokom talykh vod i smyvom pakhotnykh pochv na sklonovykh zemlyakh Altaiskogo kraya* (Experience in the use of anti-erosion hydraulic structures in the fight against meltwater runoff and flushing of arable soils on the slope lands of the Altai Territory). *Vestnik Altaiskogo agrarnogo universiteta* (Bulletin of the Altai State Agrarian University). 2017. P. 42–48. (in Russ.)
 19. Bontemps S., Van Bogaert E., Defourny P., Kalogirou V., and Arino O. GLOBCOVER 2009 Products Description and Validation Report. *ESA Bulletin*. 2011. 53 p.
 20. Litvin L.F. *Geografiya erozii pochv sel'skokhozyaistvennykh zemel' Rossii* (Geography of soil erosion in agricultural lands of Russia). Moscow: Akademkniga (Publ.), 2002. 255 p. (in Russ.)
 21. Chalov S.R., Terskii P.N., Efimova L.E., Terskaya A.I., Efimov V.A., and Danilovich I.S. *Problemy gidrologicheskogo monitoringa v basseynakh transgranichnykh rek Vostochnoi Evropy (na primere Zapadnoi Dviny)* (Problems of hydrological monitoring in the basins of transboundary rivers of Eastern Europe (on the example of the Western Dvina)). *Inzhenernye izyskaniya* (Engineering surveys). 2019. Vol. 13. P. 32–44. (in Russ.)
 22. Kurakova A.A. and Chalov R.S. *Razmyvy beregov na shirotnom uchastke srednei Obi i ikh svyaz' s morfologiei rusla* (Coast washouts in the latitudinal section of the Middle Ob and their connection with the morphology of the riverbed). *Geograficheskii vestnik*. 2019. No. 3 (50). P. 34–47. (in Russ.)
 23. Chalov R.S., Evstigneev V.M., and Zaitsev A.A. *Ruslovoi rezhim rek Severnoi Evrazii (v predelakh byvshego SSSR)* (Channel regime of the rivers of Northern Eurasia (within the former USSR)). Moscow: Izd-vo MGU (Publ.), 1994. 335 p. (in Russ.)
 24. Dunne T., Mertes L.A.K., Meade R.H., Richey J.E., and Forsberg B.R. Exchanges of sediment between the flood plain and the channel of the Amazon River in Brazil. *Geological Society of America Bulletin*. 1998. Vol. 110. P. 450–467.
 25. Panagos P., Borrelli P., Meusburger K., Alewell C., Lugato E., and Montanarella L. Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale. *Land Use Policy*. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.05.021>
 26. Morgan R.P.C. and Nearing M.A. *Handbook of Erosion Modelling*. Wiley-Blackwell, New Jersey. 2011. 68 p.
 27. IUSS Working Group WRB World Reference Base for Soil Resources 2014, updates 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 2015.
 28. Sharpley A.N. and Williams J.R. Erosion Productivity Impact Calculator: 1. Model Documentation (EPIC). Technical Bulletin-United State Department of Agriculture. 1990. No. 1768. 235 p.
 29. Panagos P., Boni M., Ballabio C., Borrelli P., Meusburger K., Yu B., Klik A., Lim K.J., Yang J.E., Ni J., Miao C., Chattopadhyay N., Sadeghi S.H., Hazbavi Z., Zabihi M., Larionov G.A., Krasnov S.F., Gorobets A.V., Levi Y., Erpul G., Birkel C., Hoyos N., Naipal V., Oliveira P.T.S., Bonilla C.A., Meddi M., Nel W., Al Dashti H., Diodato N., Van Oost K., and Nearing M. Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. *Scientific Reports*. 7. 4175. 2017. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04282-8>
 30. Porter C., Morin P., Howat I., Noh M.-J., Bates B., Peterman K., Keesey S., Schlenk, M., Gardiner J., Tomko K., Willis M., Kelleher C., Cloutier M., Husby E., Foga S., Nakamura H., Platson, M., Wethington M.J., Williamson C., Bauer G., Enos J., Arnold G., Kramer W., Becker P., Doshi A., D' Souza C., Cummins P., Laurier F., and Bojesen M. "ArcticDEM". <https://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKH>, Harvard Data verse, V1, [Accessed 09.12.20].
 31. Sidorchuk A.Yu. The fluvial system on the East European plain: sediment source and sink. *Geography, Environment, Sustainability*. 2018. Vol. 11. Iss. 3. P. 5–20.