

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 556.5, 556.537

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ПЛАНОВЫХ ПЕРЕФОРМИРОВАНИЙ РЕКИ КАМЧАТКИ

© 2021 г. С. Р. Чалов^а, А. С. Чалова^{а, *}, Д. И. Школьный^а

^аМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия

*e-mail: Aleksandra-1984@mail.ru

Поступила в редакцию 30.09.2019 г.

После доработки 02.10.2020 г.

Принята к публикации 22.12.2020 г.

Выполнена количественная оценка плановых переформирований 600-километрового участка широкопойменного русла р. Камчатки. На основе полуавтоматического ГИС-дешифрирования космических снимков (архив снимков с 1965 г. по настоящее время) установлено, что протяженность берегов, подверженных размыву, составляет 37% длины левого и 44% длины правого берега. Объем поступающего в результате русловых деформаций материала значительно превосходит сток наносов. Доля бассейновой составляющей оценивается в 45%, русловой – в 55%. Вниз по течению реки по мере снижения уклонов русла уменьшаются темпы размыва берегов. Количественный анализ и прогноз плановых переформирований участка реки требует дифференцированной оценки для разных морфодинамических типов русла, с учетом особенностей русловых процессов на вышележащих участках. Обсуждаются полученные прогностические уравнения размыва берегов для меандрирующего русла и пойменно-русловой многорукавности р. Камчатки.

Ключевые слова: размывы берегов, плановые переформирования, сток наносов, геоинформационные системы, река Камчатка, Камчатский край

DOI: 10.31857/S2587556621020035

ВВЕДЕНИЕ

Одним из актуальных вопросов изучения русловых процессов остается выработка надежной системы количественного прогнозирования размывов берегов (горизонтальных русловых деформаций). Она необходима при проектировании гидротехнических сооружений, разработке схем защиты населенных пунктов и хозяйственной инфраструктуры от воздействия речных вод. Действующий методический аппарат либо основывается на использовании данных по рекам-аналогам (СТО ГУ ГГИ 08.29-2009), либо на инерционном прогнозе по данным ретроспективного анализа русловых процессов. В этой связи детальные оценки плановых переформирований приобретают особую значимость. Они используются и для выработки численных моделей размыва берегов, которые часто рассматривают скорость береговой эрозии как функцию морфометрических характеристик русла (например, отношения радиуса кривизны излучины r к ширине русла w). В отечественной литературе широко известны зависимости скорости смещения берегов от показателя степени развитости излучин l/L , где l – длина и L – шаг излучины (Кондратьев, 1982; Маккавеев, 1955). Модели размыва берегов, основанные на прямых

соотношениях с определяющими факторами – водностью (Беркович, Власов, 1982), уклонами русла (Опасные..., 2014), морфометрическими характеристиками русла (Dai et al., 2018; Hickin, Nanson, 1983) и др. – часто плохо отражают реальные схемы плановых переформирований, что связано в первую очередь с их применимостью исключительно к меандрирующим рекам. Детальных оценок количественных переформирований и объемов поступления наносов от размывов берегов, дифференцированных по морфодинамическим типам русла, крайне мало, а существующие оценки (Lehotský et al., 2018; Mandarin et al., 2018) характеризуют ограниченный набор типов рек и природных условий. Многие речные системы и типы русел до настоящего времени не изучены с точки зрения интенсивности и временной изменчивости русловых деформаций, что и является препятствием для выработки надежной системы прогнозирования горизонтальных деформаций.

К недостаточно изученным объектам относятся крупные реки Камчатского края, где вопросы количественной оценки русловых переформирований неустойчивых русел рек, к которым здесь относятся в первую очередь пойменно-русловые разветвления, практически не рассматривались (Ермакова, 2009; Завадский и др., 2015). В целом

МЕТОДЫ

это характерно для вулканических районов и других регионов (Woolfe, Purdon, 1996). Характерные типы переформирований пойменно-русловых разветвлений (прорывы поймы, перераспределение расходов воды между рукавами, приводящее к последовательной интенсификации размывов берегов в разных рукавах) плохо согласуются с известными теоретическими (критериальными) подходами к оценке устойчивости русла (Чалов, 2008). Именно эти типы русла вместе со свободными излучинами преобладают по длине крупнейшей водной артерии Камчатского полуострова — р. Камчатки. Здесь находится большое количество населенных пунктов, в которых наблюдается или прогнозируется катастрофическая ситуация, связанная с размывом берегов. В поселке Долиновка (численность населения — 315 чел., 2010 г.) в результате интенсификации размыва излучины р. Камчатки за последние 20 лет было смыто 30% территории. Частичные разрушения наблюдаются в селах Майское и Кирганик. В результате разрушения берега были полностью оставлены села Красный Яр, Крахча, Машура, совхоз Макарка и большое количество небольших населенных пунктов и заимок. Постоянного переноса требуют транспортные коммуникации и переправы, от которых во многом зависит жизнедеятельность поселений. Указанные проявления размывов берегов делают задачу изучения плановых переформирований р. Камчатки исключительно актуальной. Для ее достижения, с учетом распространения пойменно-русловых разветвлений, требуется специальный аппарат оценки, основанный на ГИС-анализе совмещенных планов русла, восстановленных по доступным космическим снимкам и картографическим ресурсам (Lehotský et al., 2018), что значительно расширяет возможности руслового анализа по сравнению с традиционными методами (Чалов, 2006). Выявление связей полученных параметров разветвленного русла с факторами русловых процессов определяет возможность количественного прогнозирования переформирований неустойчивых русел.

В работе проведена оценка темпов и факторов плановых переформирований р. Камчатки. Для этого обоснована классификация морфодинамических типов русла этой реки и дана характеристика их пространственной (продольной) изменчивости. Для каждого выделенного типа русла проведен количественный анализ темпов размыва берегов на основе ретроспективного ГИС-анализа и выполнены дифференцированные по типам русла расчеты темпов плановых переформирований и закономерностей их развития. Полученные результаты использованы для оценки вклада русловой эрозии в сток наносов, а также апробации существующих моделей размыва берегов и обоснования их применимости к различным типам русла.

Анализируется участок долины реки длиной 583 км от с. Шаромы (ПК 1), выше которого русло имеет полугорный характер. Нижней границей выбран участок подхода реки к хребту Кумроч (Камчатские Щёки, ПК 583) (рис. 1), где происходит резкое сужение долины, смена широкопойменного разветвленного русла на врезанное прямолинейное. Ниже по течению уже располагается устьевая область реки.

Оценка русловой эрозии производилась путем сопоставления контуров русла по привязанным снимкам 1964–1975 гг. программы KeyHole и современным (2012–2018 гг.) снимкам Quickbird, Worldview и Spot. Благодаря этому удалось расширить период сопоставления до 50 лет и в результате получить комплексную оценку переформирований вне зависимости от периодов водности и отдельных импактных событий (в частности, извержений вулканов или циклов прорыва излучин). На исследуемом участке долины р. Камчатки было выявлено 635 участков размыва русла — отступления береговой линии. Для количественной оценки трансформации пойменно-русловых разветвлений был разработан метод индикации плановых переформирований (ИПП), основанный на расчете площадей зон размыва (F_3 , м²), намыва (F_2 , м²) и неизменившегося русла (F_1 , м²). Для анализа больших по протяженности и площади участков русла реки использовались методы полуавтоматического дешифрирования, основанные на подборе комбинаций каналов мультиспектральных снимков и классификации с обучением. Все спутниковые данные — как снимки за период 1964–1975 гг., так и современные — привязывались в программном комплексе ESRI ArcGIS к пространственной основе по как минимум 20 контрольным точкам. Все спутниковые данные были приведены к единой системе координат.

Любой участок русла (речной долины) представлялся состоящим из трех участков (рис. 2): 1 — неизменившееся русло, соответствующее границам русла, сохранившимся в исследуемый отрезок времени; 2 — область образования новой поймы, сформировавшейся за исследуемый период вследствие деформаций (смещений) русла; 3 — область размыва, соответствующая части поймы, уничтоженной за исследуемый период в ходе русловых деформаций и смещений русла.

Полученные параметры использованы для оценки скорости размыва берегов в пределах зоны размыва. Для этого площадь размываемого берега F_3 соотносилась с длиной зоны размыва L



Рис. 1. Исследуемый участок р. Камчатки. Гидрологические посты: Верхне-Камчатск, Козыревск, Ключи, Большие Щёки.

(см. рис. 2), что позволяло определить его среднюю ширину:

$$B = \frac{L}{F}. \quad (1)$$

При делении получившегося значения на количество лет n между съемками получены скорости размыва берега за период (3):

$$C_{\text{факт}} = \frac{B}{n}. \quad (2)$$

Это значение характеризует среднюю скорость размыва берега за интервал времени. Сопоставление этих данных с высотой пойменного массива H (м), рассчитываемой относительно средней глу-

бины русла в створе размыва, позволяет определить объем русловых отложений, поступивших в русло реки в результате размыва берегов (M , м³/год):

$$M = C_{\text{факт}} HL. \quad (3)$$

Для оценки стока наносов, поступающего за счет размыва берегов (Wr , т/год), использовалась плотность пойменных отложений 1470 кг/м³, установленная ранее для грунтов, слагающих поймы камчатских рек (Опасные..., 2014; Школьный и др., 2018).

Значения высот берегов получены с использованием цифровой модели рельефа ArcticDEM (<https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem/>) вручную путем построения поперечных профилей в

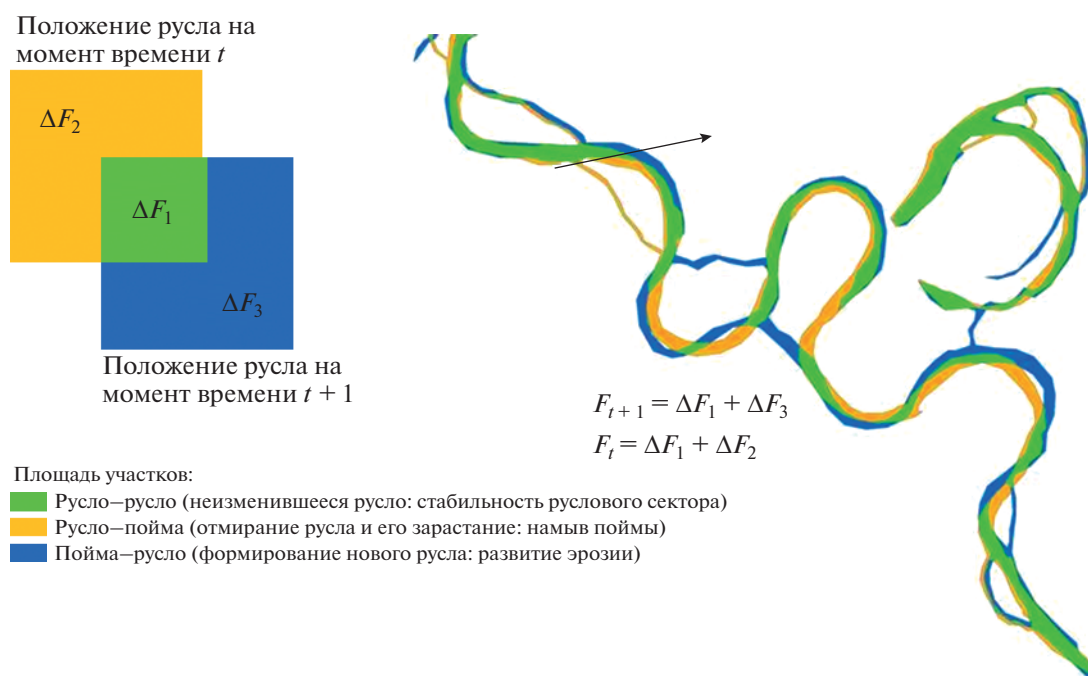


Рис. 2. Метод индикации плановых переформирований для расчета параметров эволюции участков пойменно-руслового комплекса разветвленной реки.

створах наибольшего размыва на выделенных участках, снятия абсолютного значения высоты берегового уступа и вычитания соответствующей данному пикету высоты уреза воды, принятого по анализу SRTM. Несмотря на значительную погрешность, возникающую при применении данной методики, более точные результаты (для существующих в настоящее время моделей рельефа) возможны только при детальном анализе каждой ячейки-источника съемочной миссии, водного режима на дату съемки и требуют значительных объемов наземной верификации (Hickin, Nanson, 1983). В то же время полученные значения относительной высоты берегов для обследованных участков в районе населенных пунктов соответствуют измеренным превышениям бровок над урезами воды на спаде половодья с расхождением до 0.7 м.

Уклоны русла р. Камчатки были получены с использованием цифровой модели рельефа SRTM GL1 v3 (NASA JPL, 2013), показавшей наиболее корректное определение положения гидрографической сети в рельефе для данной территории по сравнению с другими моделями рельефа (ASTER, GTOPO, ArcticDEM). По модели рельефа была построена гидрографическая сеть, затем она разбивалась на пикеты с дискретностью 100 м, для которых были получены абсолютные отметки высоты. Значения уклона рассчитывались путем получения скользящего среднего из ряда значений высот.

Полученные значения о скоростях размыва берегов сравнивались со значениями, рассчитанными по моделям размыва, получившим наиболее широкое применение в практике руслового анализа. Использованы расчеты скоростей размыва берегов по формуле К.М. Берковича (Беркович, Власов, 1982):

$$C_{\text{расч}} = K(Q^2 I / d H_6), \quad (4)$$

где $C_{\text{расч}}$ — скорость размыва берегов, Q — расход воды, I — уклон русла, d — крупность руслообразующих наносов, H_6 — высота размываемого берега, K — коэффициент с размерностью $(\text{м}^3/\text{с})^{-1}$, изменяющийся в пределах от 6.0×10^{-3} до 0.8×10^{-5} в зависимости от водности реки. Значения средних расходов воды, используемых в формулах для расчета скоростей размыва берегов, получены по данным многолетних наблюдения на пяти гидрологических постах р. Камчатки в пределах исследуемого участка (Верхне-Камчатск, Долиновка, Лазо, Козыревск, Ключи). Период наблюдения на постах варьирует от 40 до 70 лет, за последние 15 лет данные о средних многолетних расходах воды имеются только по двум постам — Верхне-Камчатск и Козыревск, по г/п Ключи имеются данные до 2006 г. Интерполяция изменения расходов воды по длине реки между гидрологическими постами осуществлялась с использованием зависимости расхода воды (Q) от порядка реки по системе Шайдеггера (N) — $Q_{\text{ср}} = ae^{bN}$, где a и b — региональные коэффициенты (Алексее-

Таблица 1. Последовательная смена морфодинамических типов русла р. Камчатки и соответствующие им морфологические характеристики

№	ПК, км	Морфодинамический тип русла	Ширина пояса руслоформирования	Уклон русла
1	14–76	Меандрирующее русло с русловыми и пойменными разветвлениями	2050	0.75
2	76–102	Пойменно-русловая многорукавность	1430–1700	0.50
3	102–133	Меандрирующее русло с русловыми и пойменными разветвлениями	2200	0.58
4	133–402	Меандрирующее русло	5500	0.27
5	402–513	Разветвленно-меандрирующее русло	2000	0.13
6	513–583	Пойменно-русловая многорукавность	1300–2500	0.01

евский и др., 2004; Ермакова, 2009). Погрешность расчетов оценивалась по формуле:

$$\Delta = \frac{C_{\text{факт}} - C_{\text{расч}}}{C_{\text{факт}}} (\%). \quad (5)$$

На нижнем участке, по современным данным (Фролова и др., 2014), среднегодовой расход воды составляет $Q = 892 \text{ м}^3/\text{с}$ (г/п Большие Щёки). Расчетные значения расходов воды привязывались к имеющимся данным наблюдений за стоком взвешенных наносов по постам Козыревск и Большие Щёки, находящимся соответственно в нижней части и ниже исследуемого участка (см. рис. 1). Среднемноголетний годовой сток взвешенных наносов W_R был рассчитан по графикам связи $W_R = f(S)$, где S – мутность воды, и составил 2.2 млн т/год (Школьный и др., 2018). Расчеты Л.В. Куксиной (Kuksina, Alexeevsky, 2014) показывают, что доля влекомых наносов W_G в суммарном стоке р. Камчатки составляет 14%. Таким образом, суммарный сток наносов W равен 2.5 млн т/год. Период относительно повышенного стока, отмечаемый для начала восьмидесятых годов, сменился на период пониженного стока, характерный для 1980–2005 гг. В последние годы снова наметился рост расхода воды, при этом в целом расходы воды однородны (Фролова и др., 2014). По разностно-интегральным кривым учитывалось, что в исследуемый период (с 1960-х годов) наблюдается повышение стока наносов (Школьный и др., 2018; Kuksina, Alexeevsky, 2014).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Морфодинамические типы русла. Река Камчатка на протяжении порядка 650 км течет по Центрально-Камчатской равнине; ее русло становится равнинным ниже с. Шаромы (655 км от устья, при общей длине реки 758 км). По длине реки выделяется 6 морфологически однородных участков, соответствующих разным типам русла (табл. 1). В условиях больших уклонов формируются меанд-

рирующие неразветвленные русла, напротив, при снижении уклонов происходит некоторое распластывание потока, сопровождающееся формированием разветвлений – 2-й участок (ПК 76–102). Максимальные значения ширины пояса руслоформирования (до 5–6 км) характерны для 4-го участка (ПК 133–402), в пределах которого река имеет исключительно меандрирующее русло.

Основным морфодинамическим типом русла является свободное меандрирование, протяженность участков меандрирующего равнинного русла составляет более 65% длины реки. Встречаются излучины от пологих сегментных ($l/L < 1.4$) до крутых омеговидных ($l/L > 2.0$). В пределах каждой серии степень развитости излучин возрастает вниз по течению, что соответствует общим представлениям о развитии излучин (Чалов, 2011). Высокие показатели степени развитости излучин на р. Камчатке обусловлены наличием высокой, редко затопляемой поймы, а также распространением густой пойменной растительности. Оба эти условия препятствуют образованию спрямлений при прохождении высоких расходов воды; излучины постепенно искривляются, достигая стадии петлеобразных, спрямление их происходит путем встречного размыва берегов на крыльях. Постепенное увеличение водоносности реки вниз по течению находит отражение в увеличении средних значений параметров излучин (табл. 2).

Разветвленные русла распространены на локальных участках реки. Развитие пойменных разветвлений связано с особенностями формирования и функционирования пойменного потока в период повышенной водности. На одних участках расходы высоких паводков и половодья проходят в бровках поймы, что не способствует формированию пойменных проток (р. Камчатка – с. Лазо). На других участках половодный поток, растекаясь по широкой, до нескольких километров, пойме, имеет очень малую глубину (р. Камчатка – с. Долиновка, п. Козыревск) (Ермакова, 2009).

Таблица 2. Изменение средних значений параметров излучин по длине р. Камчатки

ПК	Участок	Параметры излучин, м				Порядок реки $N_{ш}$
		длина, l	шаг, L	радиус кривизны, r	стрела прогиба, h	
28–34	Ниже с. Шаромы	980	400	250	340	9.72
102–110	Выше устья р. Кирганик	1650	1050	660	650	10.6
169–177	с. Долиновка	1850	1000	670	670	11.6
296–307	с. Лазо	1900	1050	670	690	12.2
296–404	с. Козыревск	2390	1210	730	850	12.9

Разветвления отличаются по генезису. Если в верхнем течении участок разветвленного русла связан с остановкой крупнообломочного материала, выносимого из горной области (ПК 76–102), то в нижнем течении р. Камчатки, в зоне современного вулканизма, значительная водность и преимущественно аккумулятивная деятельность реки способствуют образованию разветвленного русла. Ниже впадения р. Козыревки (368 ПК) количество разветвлений значительно возрастает, повсеместно распространены одиночные разветвления в пределах меандрирующего русла. В районе с. Ключи (532 ПК) на р. Камчатке формируется разветвленное русло, которое распространено вплоть до самого устья за исключением участка Камчатских Щёк, где река прорезает горный хребет и имеет врезанное прямолинейное русло.

В целом в пределах исследуемого участка разветвленное русло встречается: в начале участка, ниже с. Шаромы (ПК 0–14) — на протяжении 14 км, здесь русло еще имеет полугорный тип русловых процессов; в районе с. Мильково (ПК 76–102) — на протяжении 26 км; ниже впадения р. Козыревки и до впадения р. Еловки (ПК 402–515) — на протяжении 100 км участки разветвленного русла чередуются с разветвлено-извилистыми; ниже с. Ключи (ПК 532) и до нижней границы исследуемого участка — пойменно-русовая многорукавность распространена на протяжении 70 км.

На участках свободного меандрирования значительно распространены также одиночные разветвления, в особенности в нижней части исследуемого участка. Развитие одиночных русловых разветвлений и разветвленных участков при преобладании меандрирующего русла связано с протеканием реки через область активного вулканизма. На участке реки ниже 360 ПК правобережные притоки, крупнейшим из которых является р. Толбачик, привносят много наносов, которые впоследствии переотлагаются, образуя одиночные русловые разветвления.

Особенности размывов берегов. 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 соответ-

ствует в среднем величине $\Delta F_3 = 670000$ м²/год. Протяженность берега, подверженного размыву, составляет 37% длины левого и 44% длины правого. В результате размыва берегов на участке Центрально-Камчатской равнины в русло поступают около 3.5 млн т/год. В отдельные годы эта величина может увеличиваться до 4–4.5 млн т/год в результате прорыва излучин. Таким образом, редукция стока наносов руслового происхождения ($k = Wp/W$) составляет $k = 2$, т.е. не менее половины материала, поступающего за счет размыва берегов, аккумулируется в русле, а в периоды повышенного стока — на пойме. По имеющимся наблюдениям (Махинов, 2006), именно переотложение на поверхности поймы играет определяющую роль в балансе наносов равнинных рек. С учетом того, что бассейновая составляющая стока наносов для нижнего течения р. Камчатки оценивается величиной около 1.2 млн т (Школьный и др., 2018), доля бассейновой составляющей оценивается в 45%, а русловой — в 55%.

По длине реки размывы вершин излучин определяют 69% от общего объема материала, поступающего за счет эрозии берегов. Вклад размывов островов и берегов относительно прямолинейных участков оценивается в 18%. В результате прорывов излучин формируются оставшиеся 13% продуктов русловой эрозии. При этом формирование только одного прорыва излучины (за 1 год) может приводить к поступлению количества наносов, превышающего аналогичные за весь период развития этой излучины. Например, после произошедшего в 1993 г. прорыва излучины, приведшего к полному исчезновению покинутого с. Машура, в русло единовременно поступило до $Wp = 1029000$ т материала, что составляет около 46% годового стока наносов ($Wp/W = 0.5$).

Пространственные закономерности размыва берегов следует рассматривать в двух масштабах: продольного профиля реки (мелкий масштаб) и отдельных морфологически однородных участков (крупный масштаб). В продольном профиле реки наблюдается соответствие уклона русла и темпов деформаций: максимальные скорости размывов наблюдаются в верховьях и уменьшаются вниз по течению вместе с уклонами. Снижение

Таблица 3. Темпы размыва берегов в зависимости от типов русла р. Камчатки

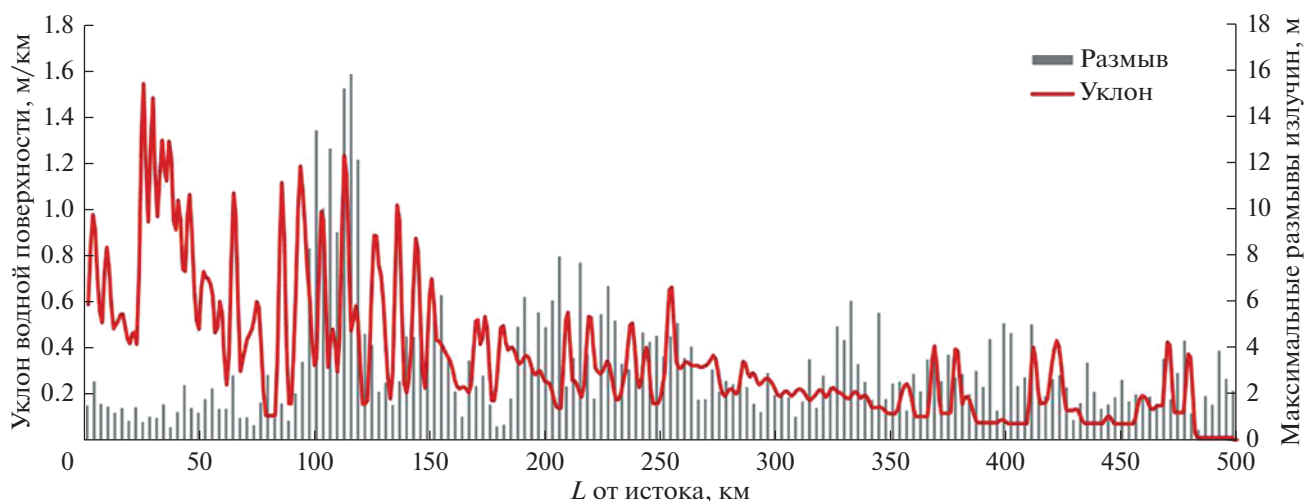
ПК, км	Морфодинамический тип русла	Величина размыва берегов, м/год		
		Средняя	Макс.	Ср. макс.
14–76	Меандрирующее русло, с русловыми и пойменными разветвлениями	1.00	11.7	1.76
76–102	Пойменно-русловая многорукавность	3.80	15.8	6.06
102–133	Меандрирующее русло, с русловыми и пойменными разветвлениями	1.80	6.27	2.85
133–402	Меандрирующее русло	1.15	7.90	1.94
402–513	Разветвленно-меандрирующее русло	0.50	4.30	0.95
513–583	Пойменно-русловая многорукавность	0.60	6.15	1.19

темпов размыва берегов в продольном континууме реки наблюдается на фоне увеличения водности реки и снижения крупности руслоформирующих и пойменных отложений, на р. Камчатке особенно ярко выраженных в связи с вхождением долины реки в область активного современного вулканизма.

На этом фоне в более крупном масштабе наблюдается трансформация интенсивности размыва берегов в связи со сменой морфодинамических типов русла (табл. 3). Верхний рассматриваемый участок реки (ПК 14–76) характеризуется максимальными уклонами и меандрирующим руслом при относительно невысоких темпах размыва берегов, что связано с транзитным режимом выноса материала при относительно малом размере реки. Максимальные размывы (в среднем в вершинах излучин от 9 до 16 м/год, рис. 3) характерны для участка реки от с. Мильково (ПК 80) до устья р. Кирганик (ПК 110). На этом участке ши-

рокопойменное извилистое русло реки разветвляется на рукава и становится разветвленно-меандрирующим. Формирование этого типа русла является характерным для полугорных рек при выходе из горной области, где происходит массовая аккумуляция поступающего материала и соответствующее ему увеличение неустойчивости русла. При этом уклоны русла здесь остаются довольно высокими по сравнению с нижележащими участками: 0.8–1.2 м/км.

Ниже по течению уклоны уменьшаются до 0.4–0.6 м/км. В пределах неразветвленного участка среднего течения р. Камчатки (134–402 ПК) темпы размывов берегов значительно ниже (2–7 м/год). Здесь же расположены участки максимального поступления в реку наносов пирокластического происхождения при впадении притоков, дренирующих склоны активных вулканов Ключевской группы и Шивелуча (Школьный и др., 2018; Kuksina, Alexeevsky, 2014).

**Рис. 3.** Максимальные размывы берегов и уклон водной поверхности по длине р. Камчатки.

Примечание: Уклоны водной поверхности по данным SRTM GL3.

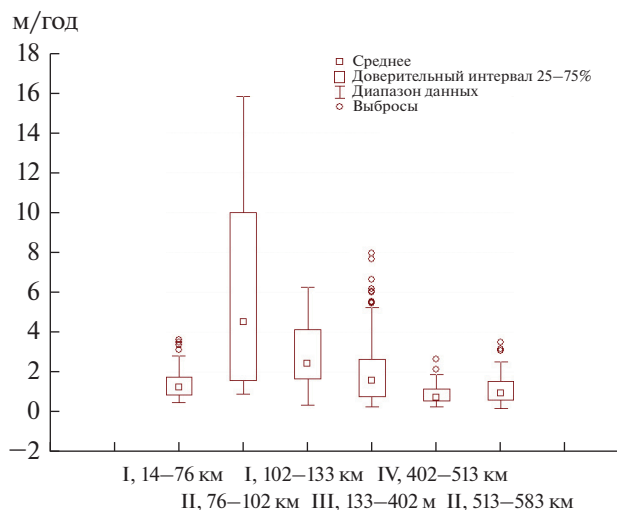


Рис. 4. Значения размывов берегов (м/год) в пределах разных типов русла р. Камчатки (I – меандрирующее русло с одиночными русловыми и пойменными разветвлениями, II – пойменно-русловая многорукавность, III – меандрирующее русло, IV – разветленно-меандрирующее русло).

Темпы размывов дифференцируются по типам русла (рис. 4), однако по длине реки эти закономерности нивелируются за счет изменения геолого-геоморфологических факторов, изменения водности и уклонов русла. На участке развития пойменно-русловой многорукавности (ПК 76–102 км) отмечается максимальный диапазон значений размывов берегов – в пределах доверительного интервала 25–75% его величина изменяется от 0.8 до 10 м/год. Одновременно самые низкие темпы размывов характерны также для разветвленного русла, но расположенного в нижнем течении р. Камчатки (ПК 402–583). Одной из причин высоких темпов переформирования в пределах разветвленного русла являются экстремальные непериодические плановые переформирования, в частности произошедшие в результате указанного прорыва излучины в 1993 г. на р. Камчатки возле заброшенного с. Машура. Это привело к обширной аккумуляции материала ниже на участке, проявляющейся в подъеме уровня дна, формировании обширных аккумулятивных форм и в итоге ведущей к ускорению размыва берегов ниже прорыва, сохраняющемуся до настоящего времени – до 21 м/год (15% от ширины реки на участке). Подобные темпы деформаций, а также непредсказуемость и скорость их развития позволяют отнести такие явления к экстремальным проявлениям русловых процессов (Чалов, Школьный, 2018). Следует отметить, что подобный механизм в целом характерен для равнинных широкопойменных рек. Например, на сходного размера р. Вайбаш (США) (Zinger et al., 2011) (средний годовой расход воды 881 м³/с) в результате прорыва

излучины в 2009–2010 гг. за 26 мес. развития спрямления в русло поступил объем наносов, сопоставимый с аналогичной величиной за период с 1938 по 2006 г.

Совершенно другой генезис разветвлений нижнего течения реки, где основным фактором их формирования является размер реки и разделение единого потока на динамические оси, что определяет значительно более стабильный режим переформирования разветвленного русла в этой зоне. Для данного участка характерно сужение днища долины, русло реки располагается преимущественно под правым берегом, ширина пояса руслоформирования снижается до 2 км (для сравнения, выше по течению на участке распространения меандрирующего русла ее величина составляет 5–5.5 км, см. табл. 1). В продольном профиле разветвления в нижнем течении реки не являются участками максимальных размывов берегов.

Подобный режим отражает саморегулирующий характер развития морфодинамических типов русла: избыточное поступление материала за счет наличия источников в бассейне или размыва на вышерасположенных участках реки приводит к активной аккумуляции и формированию разветвленного русла, что, в свою очередь, является причиной интенсификации размыва берегов. Рассредоточение потока по рукавам в условиях свободного развития русловых деформаций и высоких уклонов водной поверхности является причиной дополнительной интенсификации размывов берегов и русловых переформирований. Ниже по течению по мере снижения объема перемещаемого в русло материала за счет аккумуляции разветвленный тип русла постепенно утрачивается. Разовое (экстремальное) поступление большого объема материала в результате прорыва одной только излучины приводит к многократному перераспределению материала на нижерасположенных участках реки. Аналогично, местные источники поступления материала, связанные с притоками, определяют формирование локальных максимумов размыва берегов ниже впадения рр. Кирганик, Большая Кимитина, Щапина (ПК 110, 160, 267 км, соответственно) (см. рис. 3).

Прогнозирование темпов размывов берегов. Проведена оценка адекватности существующих моделей размыва, применяемых в практике русловых изысканий. Полученные результаты свидетельствуют о том, что использование эмпирических формул для расчета скоростей размыва берегов часто не позволяет получить достоверные результаты. Так, в формулах О.М. Пахомовой (2001) скорость размыва берегов рассчитывается как функция уклона водной поверхности реки. Результаты, полученные по данным формулам, оказались в основном сильно завышенными по

Таблица 4. Погрешность расчета размыва излучин для разных типов русла по длине р. Камчатки

ПК, км	Морфодинамический тип русла	Величина размыва берегов, м/год		Δ (%)*
		фактическая	по формуле Берковича	
При использовании данных о крупности русловых отложений на участке по постам УГМС				
14–76	Меандрирующее, с русловыми и пойменными разветвлениями	1.05	0.17	+84
76–102	Пойменно-русловая многорукавность	3.81	0.50	+87
102–133	Меандрирующее, с русловыми и пойменными разветвлениями	1.75	1.15	+35
133–402	Меандрирующее	1.15	2.46	<−100
402–513	Разветвленно-меандрирующее русло	0.50	4.01	<−699
513–583	Пойменно-русловая многорукавность	0.58	1.00	−71
При фактической оценке крупности русловых отложений на участке реки				
175	Меандрирующее	4.88	5.64	15.6
176		6.03	7.01	16.1
177		3.24	3.86	19.1

* По формуле (4): знак “+” соответствует занижению расчетных значений по сравнению с фактическими данными; знак “–” – завышению.

сравнению с фактическими данными. Ряд эмпирических формул, основанных на зависимости скоростей размыва берегов от морфометрических показателей русла (Hickin, Nanson, 1983), также не дает достоверных результатов в связи с отсутствием в формулах гидравлических характеристик (расхода воды, мощности потока), безусловно влияющих на интенсивность размыва.

Формула К.М. Берковича, выбранная в данной работе в качестве основной для расчета скоростей размыва берегов, сочетает в себе как морфометрические показатели русла (высота размываемого берега, крупность руслообразующих наносов), так и гидравлические характеристики потока (расход воды и уклон реки). Тем не менее, сопоставление полученных данных обнаруживает значительные отклонения рассчитанных значений от фактических – систематическое занижение значений в верхней части исследуемого участка и завышение – в средней и нижней частях (табл. 4).

Причины подобного несоответствия связаны с существованием ряда нехарактерных соотношений между факторами русловых процессов и режимом размыва берегов. Наиболее ярким примером в этой связи является тенденция на обратную зависимость максимальных размывов излучин от уклона водной поверхности для р. Камчатки (см. рис. 3), что связано с ведущей ролью морфодинамики русла в формировании размыва берегов. В частности, максимальные уклоны характерны для меандрирующего русла с одиночными русловыми и пойменными разветвлениями (участок 1,

14–76 км), отличающегося минимальными размывами берегов (см. рис. 4) в условиях меньшей водности потока. В ряде случаев максимальные уклоны приурочены к врезанным относительно стабильным излучинам. Наконец, в условиях распространения вулканических легкоразмываемых пород во многих случаях максимальные размывы наблюдаются на самых высоких берегах, что также не соответствует заложенным в формуле (4) закономерностям.

В целом обращает на себя внимание последовательная смена знака погрешности при движении вниз по течению, что объясняется снижением крупности материала (фактор d в формуле (4)). Отметим, что информация о крупности материала получена по нескольким точкам опробования по длине р. Камчатки (г/п Верхне-Камчатск, Долиновка, Лазо, Козыревск) и экстраполирована, что определяет высокую неопределенность используемых при расчете значений. Это позволяет сделать вывод о том, что использование нольмерных моделей размыва требует большого количества исходных данных, которые не могут быть получены на современном уровне развития мониторинговой сети наблюдений. Например, при использовании детальных данных о крупности материала, слагающего излучину р. Камчатки возле поселка Долиновка, расхождение между фактическими данными о темпах размыва берегов и рассчитанными по формуле (4) значительно ниже (табл. 4), чем при использовании данных УГМС. Таким образом, если привлекать данные экспедиционных исследований и лабораторного

анализа проб донных отложений, можно значительно снизить погрешность расчетов темпов размыва берегов.

Интегральным фактором интенсивности и режима переформирования следует рассматривать морфодинамические типы русла, что определяет необходимость дифференцированного (по типам русла) подхода к прогнозу размыва берегов. Был проведен анализ зависимости величины размыва берегов от расхода воды, уклона русла и высоты берегов. Использовалась модель множественной линейной регрессии, качество модели проверялось по коэффициенту детерминации R^2 , который является индикатором степени подгонки модели к данным (значение R^2 , близкое к 1, показывает, что модель объясняет почти всю изменчивость соответствующих переменных). Расчетные зависимости, отвечающие требованиям достоверности ($R^2 > 0.6$), получены только для двух верхних морфологически однородных участков — для меандрирующего русла (ПК 14–76):

$$C_6 = -2.41 - 0.36I - 0.06H_6 + 0.05Q \quad (6)$$

$$(R^2 = 0.67),$$

и пойменно-руслевой многорукавности (ПК 76–102):

$$C_6 = 16.13 - 8.48I + 0.37H_6 - 0.06Q \quad (7)$$

$$(R^2 = 0.78).$$

Ниже по течению для всех морфодинамических типов русла коэффициент детерминации R^2 оказался менее 0.5. Это можно объяснить значительно меньшим диапазоном изменчивости уклонов русла и темпов размыва берегов в нижнем течении р. Камчатки, что снижает возможность построения регрессионных зависимостей в силу уменьшения чувствительности параметров. Возможно, определенное влияние на режим русловых деформаций в нижнем течении может оказывать избыточное поступление пирокластического материала, оказывающего влияние на морфологию и динамику отдельных участков рек. Неучет этого фактора приводит к снижению точности прогнозных моделей. В нижнем течении также возрастает роль геолого-геоморфологических условий. Аналогично, построение модели для всей выборки (635 участков размыва) без дифференциации на морфодинамические типы русла привело к неадекватным результатам ($R^2 = 0.32$).

Проверка воспроизводимости полученных моделей была выполнена на примере первого участка (ПК 14–76). Оценка параметров уравнения (6) проводилась для нечетных пикетажей. Далее по полученному уравнению оценивался размыв берегов для четных пикетажей, данные по которым использовались в качестве независимой выборки. Полученная погрешность моделирова-

ния по формуле (5) составила в среднем 47%, что почти в 2 раза улучшает воспроизведение размыва берегов по ранее предложенным общим формулам (см. табл. 4). Таким образом, система дифференцированной оценки параметров размыва берегов, основанная на обширном статистическом оценивании факторов размыва, представляется перспективным направлением прогнозирования русловых переформирований. Улучшение качества входных данных, параметризация других факторов размыва берегов (крупность русловых отложений, сток наносов, морфометрические параметры долины) позволят получить надежные прогнозные зависимости параметров размыва берегов. Уравнения (6) и (7) могут использоваться для прогноза на неизученных реках размыва берегов полугорных рек с меандрирующим и разветвленным типом русла соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интенсивность размыва берегов меняется по длине крупной реки и в пределах отдельных типов русла. Вниз по течению р. Камчатки по мере снижения уклонов русла наблюдается уменьшение интенсивности размыва берегов. Смена типов русла соответствует изменению характера плановых переформирований. Максимум интенсивности переформирований соответствует пойменно-русловым разветвлениям полугорного участка реки в верхней части продольного профиля. Важнейшим фактором размыва берегов на локальном участке реки является объем стока наносов с вышерасположенных участков.

Выявленные закономерности следует учитывать при планировании размещения хозяйственных объектов в долине р. Камчатки. Максимальные темпы размыва берегов, характерные для пойменно-руслевой многорукавности, являются типичными для полуострова в целом (Опасные..., 2014), что требует исключения этих участков рек из хозяйственного использования. С другой стороны, исключительный (катастрофический) режим прорыва излучин и их экстремальное влияние на сток наносов определяют необходимость их заблаговременного прогнозирования. Количественный анализ и прогноз плановых переформирований участка реки предполагает учет режима русловых деформаций на вышерасположенных сегментах русла.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в НИР Лаборатории эрозии почв и русловых процессов: по гранту РНФ (проект № 18-17-00086; анализ русловых переформирований р. Камчатки, в частности, на участках разветвленного русла); по гранту РФФИ (проект № 18-05-00487; полевые ра-

боты и оценка опасных и экстремальных проявлений русловых процессов).

FUNDING

The study was supported by the Russian Science Foundation (project no. 18-17-00086; the analysis of channel changes of the Kamchatka River, in particular, on braided channel reaches); by Russian Foundation for Basic Research (project no. 18-05-00487; field study and estimation of hazard and extreme manifestations of channel processes).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеевский Н.И., Айбулатов Д.Н., Косицкий А.Г.* Масштабные эффекты изменения стока в русловой сети территории // География, общество и окружающая среда. Т. VI. Динамика и взаимодействия атмосферы и гидросферы. М.: Городец, 2004. С. 345–412.
- Беркович К.М., Власов Б.Н.* Особенности русловых процессов на реках Нечерноземной зоны РФ // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5: География. 1982. № 3. С. 28–34.
- Ермакова А.С.* Русловые процессы на реках Камчатки: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 2009. 25 с.
- Завадский А.С., Терский П.Н., Чалова А.С., Чалов С.Р., Школьный Д.И.* Условия формирования и опасные проявления русловых процессов на реках бассейна Авачи (полуостров Камчатка) // Эрозия почв и русловые процессы. Т. 19. М.: Географический факультет МГУ, 2015. С. 184–210.
- Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Сущенко Б.Ф.* Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 272 с.
- Маккаев Н.И.* Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд. АН СССР, 1955. 343 с.
- Махинов А.Н.* Современное рельефообразование в условиях аллювиальной аккумуляции. Владивосток: Дальнаука, 2006. 231 с.
- Опасные русловые процессы и среда обитания лососевых рыб на Камчатке / под ред. С.Р. Чалова, В.Н. Лемана, А.С. Чаловой. М.: Изд-во ВНИРО, 2014. 240 с. ISBN 978-5-85382-402-7.
- Пахомова О.М.* Гидролого-морфодинамические характеристики русел рек и порядковая структура речной сети: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 2001. 28 с.
- Фролова Н.Л., Становова А.В., Горин С.Л.* Режим стока воды в нижнем течении реки Камчатки и его многолетняя изменчивость // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. 2014. Вып. 32. С. 73–78.
- Чалов С.С.* Русловедение: теория, география, практика. Т. 1. Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. М.: Издательство ЛКИ, 2008. 608 с.
- Чалов С.С.* Русловедение: теория, география, практика. Т. 2. Морфодинамика речных русел. М.: Изд-во “Красанд”, 2011. 960 с.
- Чалов С.С., Школьный Д.И.* Экстремальные и специфические проявления русловых процессов: основные понятия, классификации, критерии оценки // Изв. РАН. Сер. геогр. 2018. № 1. С. 31–41.
- Чалов С.Р.* Формирование структуры русловых разветвлений // Геоморфология. 2006. № 1. С. 92–102.
- Школьный Д.И., Цыпленков А.С., Рахимов Р.А.* Генетический анализ стока наносов реки Камчатка // Тридцать третье Межвузовское пленарное совещание по проблемам эрозионных, русловых и устьевых процессов (Доклады и краткие сообщения). Нижневартковский государственный университет, Нижневартковск, 2018. С. 169–172.
- ArcticDEM. <https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem/> (дата обращения 10.09.2018).
- Dai C., Durand M., Howat I.M., Altenau E.H., Pavelsky T.M.* Estimating river surface elevation from ArcticDEM // Geophys. Res. Lett. 2018. V. 45. № 7. p. 3107–3114.
- Hickin E.J., Nanson G.C.* Channel Migration and Incision on the Beaton River // J. Hydraul. Eng. 1983. V. 109. № 3. P. 327–337.
- Hickin E.J., Nanson G.C.* The character of channel migration on the Beaton River, Northeast British Columbia, Canada // Geol. Soc. Am. Bull. 1975. V. 86. № 4. P. 487–494. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1975\)86<487:TCOC-MO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1975)86<487:TCOC-MO>2.0.CO;2)
- Kuksina L.V., Alexeevsky N.I.* Spatial and temporal variability of suspended sediment yield in the Kamchatka Krai, Russian Federation // Sediment Dynamics from the Summit to the Sea. IAHS Publ., 2015. № 367. P. 304–311.
- Lehotský M., Rusnák M., Kidová A., Dudžák J.* Multitemporal assessment of coarse sediment connectivity along a braided-wandering river // Land Degrad. Dev. 2018. V. 29. № 4. P. 1249–1261. <https://doi.org/10.1002/ldr.287>
- Mandarino A., Maerker M., Firpo M.* Channel planform changes along the Scrivia River floodplain reach in northwest Italy from 1878 to 2016 // Quat. Res. 2018. V. 91. № 2. P. 1–18. <https://doi.org/10.1017/qua.2018.67>
- NASA JPL NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 1 arc second [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2013 (дата обращения 28.03.2018).
- Woolfe K.J., Purdon R.G.* Deposits of a rapidly eroding meandering river: Terrace cut and fill in the Taupo Volcanic Zone, New Zealand // J. Geol. Geophys. 1996. V. 39. P. 243–249. <https://doi.org/10.1080/00288306.1996.9514708>
- Zinger J.A., Rhoads B.L., Best J.L.* Extreme sediment pulses generated by bend cutoffs along a large meandering river // Nat. Geosci. 2011. V. 4. № 10. P. 675–678. <https://doi.org/10.1038/ngeo1260>

Quantitative Assessment of Channel Planform Changes of the Kamchatka River

S. R. Chalov¹, A. S. Chalova^{1, *}, and D. I. Shkolnyi¹¹Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

*e-mail: Aleksandra-1984@mail.ru

A quantitative assessment of channel planform changes on the 600-km channel of the Kamchatka River was carried out. Possibilities of semi-automatic GIS-interpretation of satellite images were used for retrospective analysis of such an extended section of a large river. It was estimated that 37% of the left bank length and 44% of the right bank length are eroded. The amount of material coming into the channel due to riverbanks erosion significantly exceeds the sediment runoff, which determines channel type and regime of channel changes. Processes of bank erosion vary on the scale of the longitudinal profile and different channel types. Downstream according to decrease of channel slope, a decrease of bank erosion intensity is observed. The most important factor of bank erosion on the river local section is the volume of material coming from the upstream sections. A quantitative analysis and forecast of planform changes of a river section requires a differential assessment for different morphodynamic channel types, taking into account characteristics of channel processes in the upstream river sections. The bank erosion prognostic equations obtained for the meandering channel and the floodplain-channel multiple branches of the Kamchatka River are discussed.

Keywords: bank erosion, planform changes, sediment yield, geoinformation systems, Kamchatka River, Kachatka krai

REFERENCES

- Alekseevskii N.I., Aibulatov D.N., Kositskii A.G. Large-scale effects of changes in the channel network runoff. In *Geografiya, obshchestvo i okruzhayushchaya sreda* [Geography, Society, and Environment]. Vol. 6: *Dinamika i vzaimodeistviya atmosfery i gidrosfery* [Dynamics and Interactions of Atmosphere and Hydrosphere]. Moscow: Gorodets Publ., 2004, pp. 345–412. (In Russ.).
- Berkovich K.M., Vlasov B.N. Features of channel processes in rivers of the Non-Chernozem zone of Russia. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 1982, no. 3, pp. 28–34. (In Russ.).
- Chalov R.S. *Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika* [River Bed Science: Theory, Geography, Practice]. Vol. 1: *Ruslovyie protsessy: faktory, mekhanizmy, formy proyavleniya i usloviya formirovaniya rechnykh rusel* [Channel Processes: Factors, Mechanisms, Forms of Manifestation and River Channels Formation Conditions]. Moscow: LKI Publ., 2008. 608 p.
- Chalov R.S. *Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika* [River Bed Science: Theory, Geography, Practice]. Vol. 2: *Morfodinamika rechnykh rusel* [Morphodynamics of River Channels]. Moscow: Krasand Publ., 2011. 960 p.
- Chalov R.S., Shkolnyi D.I. Extreme and specific manifestations of channel processes: concepts, classifications, assessment criteria. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2018, no. 1, pp. 31–41. (In Russ.). doi 10.7868/S2587556618010034
- Chalov S.R. Formation of the braided channels structure. *Geomorfologiya*, 2006, no. 1, pp. 92–102. (In Russ.).
- Dai C., Durand M., Howat I.M., Altenau E.H., Pavelsky T.M. Estimating river surface elevation from ArcticDEM. *Geophys. Res. Lett.*, 2018, vol. 45, no. 7, pp. 3107–3114.
- Ermakova A.S. Channel processes on the Kamchatka peninsula rivers. *Extended Abstract of Cand. Sci. (Geogr.) Dissertation*. Moscow: Moscow State Univ., 2009. 25 p.
- Frolova N.L., Stanovova A.V., Gorin S.L. Water flow regime in the lower Kamchatka River and its long-term variability. *Issled. Vodn. Biol. Resur. Kamchatki i Severo-Zapad. Chasti Tikhogo Okeana*, 2014, no. 32, pp. 73–78. (In Russ.).
- Hickin E.J., Nanson G.C. Channel migration and incision on the Beaton River. *J. Hydraul. Eng.*, 1983, vol. 109, no. 3, pp. 327–337.
- Hickin E.J., Nanson G.C. The character of channel migration on the Beaton River, Northeast British Columbia, Canada. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1975, vol. 86, no. 4, pp. 487–494.
- Kondrat'ev N.E., Popov I.V., Snishchenko B.F. *Osnovy gidromorfologicheskoi teorii ruslovogo protsessa* [The Basics of Hydromorphological Theory of Channel Processes]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1982. 272 p.
- Kuksina L.V., Alexeevsky N.I. Spatial and temporal variability of suspended sediment yield in the Kamchatka Krai, Russian Federation. In *Sediment Dynamics from the Summit to the Sea*. IAHS Publ., 2015, pp. 304–311.
- Lehotský M., Rusnák M., Kidová A., Dudžák J. Multitemporal assessment of coarse sediment connectivity along a braided-wandering river. *Land Degrad. Dev.*, 2018, vol. 29, no. 4, pp. 1249–1261. doi 10.1002/ldr.287
- Makhinov A.N. *Sovremennoe rel'efoobrazovanie v usloviyakh allyuvial'noi akkumulyatsii* [Modern Terrain Evolution under Depositional Alluvial Patterns]. Vladivostok: Dal'nauka Publ., 2006. 231 p.
- Makkaveev N.I. *Ruslo reki i eroziya v ee basseine* [River Channel and Erosion in Its Basin]. Moscow: AN SSSR, 1955. 343 p.
- Mandarino A., Maerker M., Firpo M. Channel planform changes along the Scrivia River floodplain reach in northwest Italy from 1878 to 2016. *Quat. Res.*, 2018, vol. 91, no. 2, pp. 620–637. doi 10.1017/qua.2018.67
- NASA JPL. *NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 1 arc second* [Data set]. NASA EOSDIS Land Proces-

- ses DAAC, 2013 (accessed 28.03.2018). doi 10.5067/MEaSURES/SRTM/SRTMGL1.003
- Opasnye ruslovyie protsessy i sreda obitaniya lososevykh ryb na Kamchatke* [Channel Processes Hazards and Habitat of Salmon Fish on Kamchatka]. Chalov S.R., Leman V.N., Chalova A.S., Eds. Moscow: VNIRO, 2014. 240 p.
- Pakhomova O.M. Hydrological and morphodynamical characteristics of river channels and the order structure of the river network. *Extended Abstract of Cand. Sci. (Geogr.) Dissertation*. Moscow: Moscow State Univ., 2001. 28 p.
- Porter C., Morin P., Howat I. et al. *ArcticDEM*. Harvard Dataverse, V1, 2018. doi 10.7910/DVN/OHHUKH
- Shkolnyi D.I., Tsyplenkov A.S., Rakhimov R.A. Genetic analysis of sediment flow of the Kamchatka River. In *Tridtsat' tret'e Mezhdvuzovskoe plenarnoe soveshchanie po problemam erozionnykh, ruslovykh i ust'evykh protsessov* [33rd Interuniversity Plenary Meeting on Problems of Erosion, Channel and Wellhead (Estuarial) Processes]. Nizhnevartovsk: Nizhnevartovsk. Gos. Univ., 2018, pp. 169–172. (In Russ.).
- Woolfe K.J., Purdon R.G. Deposits of a rapidly eroding meandering river: Terrace cut and fill in the Taupo Volcanic Zone. *New Zealand J. Geol. Geophys.*, 1996, vol. 39, pp. 243–249. doi 10.1080/00288306.1996.9514708
- Zavadskii A.S., Terskii P.N., Chalova A.S., Chalov S.R., Shkolnyi D.I. Formation conditions and channel processes hazards in the Avacha river basin (Kamchatka peninsula). In *Eroziya pochv i ruslovyie protsessy* [Soil Erosion and Channel Processes]. Moscow: Geogr. Fakul'tet Mosk. Gos. Univ., vol. 19, pp. 184–210. (In Russ.).
- Zinger J.A., Rhoads B.L., Best J.L. Extreme sediment pulses generated by bend cutoffs along a large meandering river. *Nat. Geosci.*, 2011, vol. 4, no. 10, pp. 675–678. doi 10.1038/ngeo1260